



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

Curso de Engenharia Civil

Departamento de Estruturas

**VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL
DE TORRE LTEE SOB AÇÃO DE VENTO**

William Macedo Koeller

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Ronaldo Carvalho Battista, Ph.D.

FEVEREIRO DE 2012

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL
DE TORRE LTEE SOB AÇÃO DE VENTO

William Macedo Koeller

Projeto de Graduação apresentado ao corpo docente do Departamento de Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado por:

Michèle Schubert Pfeil

D.Sc., Professora Associada, EP/UFRJ (Orientadora)

Ronaldo Carvalho Battista

Ph.D., Professor Titular, COPPE/UFRJ (Co-orientador)

Sérgio Hampshire de Carvalho Santos

D.Sc., Professor Associado, EP/UFRJ

Flávia Moll de Souza Judice

D.Sc., Professora Adjunto, EP/UFRJ

FEVEREIRO DE 2012

Koeller, William Macedo

Verificação Estrutural De Torre LTEE Sob Ação De Vento/ Wiliam Macedo Koeller – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2012.

XIV, 73p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil e Ronaldo Carvalho Batista

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2012.

Referencias Bibliográficas: p. 58-60.

1. Torre LTEE 2. Ação de Vento 3. Verificação Estrutural. I. Pfeil, Michèle Schubert, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

A meus pais e irmã
Guilherme, Rutiná e Carolina

A minha noiva Paula,
pelo incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Michèle Schubert pelo aprendizado, apoio e ajuda para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu co-orientador, professor Ronaldo Battista, pela oportunidade de estágio e por ser um grande exemplo de conhecimentos teóricos e sabedoria.

A meus pais, Guilherme e Rutiná, pelo incentivo e condições de eu estar aqui hoje.

A minha irmã, pela ajuda e presença em minha vida.

Ao meu cunhado, Norton pela ajuda na correção e apoio.

À minha avó Débora e família pela compreensão nos vários momentos de ausência e pelo incentivo para que eu conquistasse meus objetivos.

Aos meus amigos de faculdade e intercâmbio por toda a ajuda, companheirismo e momentos de descontração para aliviar a pressão da Universidade.

Ao meu amigo e professor João Luiz Lincoln pelos anos de ensinamento, conselhos e amizade.

Aos meus amigos e professores que me acompanharam desde antes da faculdade, nos estudos, na busca pelos meus sonhos.

A minha noiva Paula, pelo incentivo, compreensão, companheirismo, carinho e amor. Sem você eu não estaria aqui hoje.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE TORRE LTEE SOB AÇÃO DE VENTO

William Macedo Koeller

Fevereiro/2012

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil e Ronaldo Carvalho Battista

Curso: Engenharia Civil

As torres de linhas de transmissão de energia elétrica (LTEE) no Brasil são usualmente projetadas de acordo com a NBR 5422 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, que inclui especificações das ações de vento pertinentes a este tipo de estrutura. Já para estruturas de edificações o projeto deve seguir as prescrições da NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Este trabalho trata da verificação estrutural de uma torre LTEE, apresentando uma análise comparativa entre os resultados obtidos com as especificações de ações de vento das normas citadas, além da discussão de aspectos referentes à modelagem estrutural e verificação de segurança dos elementos mais solicitados. Foram utilizados dois modelos: simplificado e completo. O primeiro modelo estrutural é constituído apenas da torre, enquanto que o segundo modelo é constituído da torre e das linhas aéreas dos vãos adjacentes a ela ancoradas. Para a obtenção dos esforços solicitantes provenientes dos carregamentos de vento foram utilizados os modelos tridimensionais de elementos finitos desenvolvidos na UFRJ em trabalhos anteriores. Os resultados mostraram que os esforços solicitantes na torre obtidos com o modelo simplificado devidos às ações prescritas pela NBR 6123 são superiores aos da NBR 5422. Considerando-se um mesmo carregamento, o modelo completo apresentou esforços solicitantes semelhantes aos do modelo simplificado. A estrutura analisada não atende aos critérios de segurança para os esforços de vento dados pela NBR 6123. Logo, torna-se oportuna uma revisão dos procedimentos atuais para o cálculo das estruturas da torre de transmissão no sentido de compatibilizar as especificações das normas citadas.

Palavras-Chave: Torre de LTEE. Ação de Vento. Verificação Estrutural

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

STRUCTURAL EVALUATION OF A TRANSMISSION LINE TOWER UNDER WIND LOAD

William Macedo Koeller

February/2012

Advisors: Michèle Schubert Pfeil and Ronaldo Carvalho Battista

Course: Civil Engineering

Overhead transmission line (OTL) towers in Brazil are designed according to the NBR 5422 – Design of overhead transmission lines, which gives specifications for the appropriate wind forces to this kind of structural system. On the other hand, for building structures, the design must follow the prescriptions of the NBR 6123 – Forces due to wind on buildings. This work deals with the structural evaluation of an OTL tower, presenting a comparative analysis of the results obtained with wind forces specified by each of the cited design codes. In addition, the issue related to structural modeling is discussed and a safety check of the most stressed components is performed. Two structural models were used in the analyses: one simplified and another complete. The simplified model represents only the tower, while the complete model is composed by the tower and the overhead lines in adjacent spans. The analyses were performed with a 3D numerical model developed at UFRJ in previous research works. The results obtained with the simplified model showed that the tower member forces resulting from the wind forces prescribed by the NBR 6123 are higher than those from the NBR 5422. Applying the same wind load specification to both models result in similar tower member forces. The analyzed structure does not meet the safety criteria if the wind action is applied according to the NBR 6123. So, it seems desirable to review current procedures for the calculation of OTL tower structures in order to conform specifications of the cited standards in terms of wind loading.

Key-words: Transmission Line Towers. Wind load. Structural Verification

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ASPECTOS GERAIS	1
1.2. HISTÓRICO DE ACIDENTES	3
1.3. OBJETIVOS E MODELOS UTILIZADOS.....	4
1.4. ORGANIZAÇÃO	5
2. FORÇAS DEVIDAS À AÇÃO DO VENTO.....	7
2.1. PROCEDIMENTO SEGUNDO NBR 5422.....	7
2.2. PROCEDIMENTO SEGUNDO NBR 6123.....	14
3. MODELO TORRE TIPO DELTA	22
3.1. TORRE AUTOPORTANTE TIPO DELTA	22
3.1.1. <i>Ligação dos condutores elétricos</i>	23
3.1.2. <i>Ligação dos pararraios</i>	24
3.1.3. <i>Descrição do modelo da torre, segundo Rodrigues [11]</i>	25
3.1.4. <i>Descrição dos Cabos</i>	28
3.1.5. <i>Descrição dos Isoladores</i>	28
3.1.6. <i>Interação Solo-Estrutura e outras Condições de Contorno</i>	29
3.2. CARGA PERMANENTE	29
4. CARREGAMENTOS DEVIDOS AO VENTO NA TORRE DELTA, MODELO SIMPLIFICADO	31
4.1. CARGA DE VENTO NA TORRE	31
4.1.1. <i>Divisão em módulos</i>	31
4.1.2. <i>Ação de vento na torre segundo NBR 5422 [1]</i>	32
4.1.3. <i>Ação de vento na torre segundo NBR 6123 [3]</i>	32
4.2. CARGA DE VENTO NOS CABOS.....	33
4.2.1. <i>Ação de vento nos cabos segundo NBR 5422 [1]</i>	33
4.2.2. <i>Ação de vento nos cabos segundo NBR 6123 [3]</i>	34
4.3. CARGA DE VENTO NOS ISOLADORES	35
4.3.1. <i>Ação de vento nos isoladores segundo NBR 5422 [1]</i>	35
4.3.2. <i>Ação de vento nos isoladores segundo NBR 6123</i>	35
4.4. RESUMO COMPARATIVO DAS FORÇAS DE VENTO	36
5. MODELO COMPLETO: TORRE, CADEIA DE ISOLADORES E CABOS.....	41
6. RESULTADOS DA ANÁLISE	43
7. VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL	48
8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
8.1. CONCLUSÕES.....	56
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

ANEXO A – DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE INTEGRAÇÃO PARA CABOS CONDUTORES E PARARRAIOS, PARA CÁLCULO DO FATOR S_2.....	61
ANEXO B - CORREÇÃO DA VELOCIDADE BÁSICA DE VENTO PARA TEMPO DE INTEGRAÇÃO DE 10 MINUTOS.....	63
ANEXO C – RESUMO DA IEC 60826 SOBRE FORÇA DE VENTO EM CABOS E OS CÁLCULOS PARTINDO DOS MESMOS DADOS PARA O CABO CONDUTOR.	64
ANEXO D – PROPRIEDADES PARA DIMENSIONAMENTO DAS CANTONEIRAS DE ABAS IGUAIS .	69
ANEXO E – CÁLCULO PARA VENTO ESTÁTICO SEGUNDO NBR 5422.....	70
ANEXO F –CÁLCULO PARA VENTO ESTÁTICO SEGUNDO NBR 6123.	71
ANEXO G – CÁLCULO DE VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL SEGUNDO NBR 8800.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do crescimento populacional e da demanda de energia per capita, [16].	2
Figura 2 – Queda de torre de transmissão de energia no Paraná em 2003, Hatashita [10].	3
Figura 3 – Modelos estruturais.	5
Figura 4 – Mapa de velocidade básica de vento V_b (m/s) [1].	8
Figura 5 - Relação entre as velocidades médias a 10m de altura, NBR 5422 [1].	10
Figura 6 – Fator de efetividade α [1].	12
Figura 7 – Coeficiente de arrasto para painéis de suportes treliçados [1].	13
Figura 8 – Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s), NBR 6123 [3].	15
Figura 9 – Coeficiente de arrasto, C_a , para torres reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondadas [3].	20
Figura 10 – Detalhe de ligação das cantoneiras (www.alibaba.com) [28].	22
Figura 11 – Esquema estrutural adotado para análise (adaptado de Rodrigues [12]).	23
Figura 12 – Isoladores de disco, Battista [29].	23
Figura 13 – Detalhe de fixação das bielas de suspensão, cotas em metros, Battista [29].	24
Figura 14 – Detalhe da ligação dos pararraios, Battista [29].	25
Figura 15 – Isométrico da torre treliçada de suporte, Rodrigues [12].	25
Figura 16 – Silhueta da torre delta (dimensões em metros), Rodrigues [12].	26
Figura 17 – Detalhe da biela de suspensão (cota em metros), Rodrigues [12].	29
Figura 18 – Projeção dos troncos de pirâmide no plano vertical (cotas em metros), Battista [29].	31
Figura 19 – Carregamento de vento aplicado no suporte (torre).	37
Figura 20 – Ponto de aplicação da força resultante de vento devido ao cabo pararraio, pela NBR 6123 [3] – $V_0 = 50$ m/s.	37
Figura 21 – Ponto de aplicação da força resultante de vento devido ao cabo condutor, pela NBR 6123 [3] – $V_0 = 50$ m/s	38
Figura 22 – Descrição vista geral (1 torre representada, 2 vãos adjacentes).	41
Figura 23 – Vista em perspectiva isométrica do modelo completo (1 torre representada, 2 vãos adjacentes).	41
Figura 24 – Detalhe das ligações dos pararraios e cabos condutores à torre (torre em elementos de pórtico espacial).	41
Figura 25 – Detalhe das condições de contorno para cabos.	42
Figura 26- Força nos cabos devido ao vento, aplicadas nodalmente.	42
Figura 27 – Ponto de verificação do deslocamento.	43
Figura 28 – Deformação dos cabos do modelo para ação de vento mais carga permanente.	44
Figura 29 – Identificação dos elementos na base da torre.	46
Figura 30 – Eixos da seção transversal de cantoneira simples [17].	49
Figura 31 – Exemplo de ligação para perfil cantoneira L 3” x 5/16” para montante (a) e diagonal (b), respectivamente. Dimensões em milímetros.	51
Figura 32 – Momento resistente segundo direção do momento resultante, alterado [5].	53

Figura C.1 – Fator combinado de vento G_c para condutores para vários tipos categoria de terreno e altura acima do solo, IEC 60826 [18].	666
Figura C.2 – Fator de vão G_L , IEC 60826 [18].	677
Figura C.3 – Definição do angulo de incidência do vento, IEC 60826 [18].	677

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz Energética Brasileira (ANEEL)	1
Tabela 2 – Coeficientes de Rugosidade do Terreno [1].	9
Tabela 3 – Valores de n para correção da velocidade de vento em função da altura [1].	10
Tabela 4 – Parâmetros Metrológicos [3].	17
Tabela 5 – Valores mínimos do fator estatístico S_3 [3].	17
Tabela 6 – Coeficientes de arrasto, C_a , para fios e cabos com $l/d > 60$ [3].	18
Tabela 7 – Valores do fator de redução, K , para barras de comprimento finito [3].	21
Tabela 8 – Coeficientes de arrasto, C_a , para barras prismáticas de seção circular e de comprimento infinito [3].	21
Tabela 9 – Carregamentos aplicados ao suporte segundo NBR 5422 [1] – $V_b = 28$ m/s	32
Tabela 10 – Carregamentos aplicados ao suporte segundo NBR 6123 [3] – $V_0 = 50$ m/s	33
Tabela 11 – Carregamentos aplicados aos cabos segundo NBR 5422 [1] – $V_0 = 28$ m/s	34
Tabela 12 – Carregamentos aplicados aos cabos segundo NBR 6123 [3] – $V_0 = 50$ m/s	35
Tabela 13 – Carregamentos aplicados nos isoladores segundo NBR 5422 [1] – $V_0 = 28$ m/s	35
Tabela 14 – Carregamentos aplicados nos isoladores segundo NBR 6123 – $V_0 = 50$ m/s	36
Tabela 15 – Comparação dos carregamentos segundo a NBR 5422 [1] e NBR 6123 [3].	38
Tabela 16 – Valores de velocidade corrigidos de acordo com o intervalo de tempo.	39
Tabela 17 – Comparação dos carregamentos segundo a NBR 5422 [1] e NBR 6123 [3].	39
Tabela 18 – Comparação dos intervalos de integração	40
Tabela 19 – Deslocamento transversal ponto A1, NBR 6123 – $V_0 = 50$ m/s	45
Tabela 20 – Deslocamento vertical ponto A1, NBR 6123 – $V_0 = 50$ m/s	45
Tabela 21 – Força axial elemento N1, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s	46
Tabela 22 – Força axial elemento N2, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s	46
Tabela 23 – Força axial elemento N3, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s	46
Tabela 24 – Força axial elemento N4, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s	47
Tabela 25 – Força axial elemento N5, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s	47
Tabela 26 – Força axial elemento N6, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s	47
Tabela 27 – Verificação estrutural à flexo tração e flexo compressão, modelo simplificado NBR 5422 – $V_0 = 28$ m/s	54

Tabela 28 – Verificação estrutural à flexo tração e flexo compressão, modelo simplificado NBR 6123 – $V_0 = 50$ m/s.....	54
Tabela 29 – Verificação estrutural à flexo tração e flexo compressão, modelo completo NBR 6123 – $V_0 = 50$ m/s	55
Tabela C.1 – Coeficientes de Rugosidade do Terreno, IEC 60826 [17].	65
Tabela C.2 – Fator de correção τ da pressão dinâmica de referência de vento devido a altitude e temperatura, IEC 80826 [17].	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISC	<i>American Institute of Steel Construction, Inc.</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPS	<i>Extended Pressure System</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LTEE	Linha de Transmissão de Energia Elétrica
OTL	<i>Overhead Transmission Line</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
TTEE	Torre de Transmissão de Energia Elétrica
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

1. INTRODUÇÃO

1.1. Aspectos Gerais

No Brasil existe atualmente uma matriz energética bem diversificada, com mais de 90 mil quilômetros de linhas de transmissão de alta voltagem (69kV a 765kV), formando o Sistema Interligado Nacional (SIN), que atende cerca de 98% do consumo energético brasileiro, segundo informações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [11]. Na Tabela 1 é possível ver a matriz energética brasileira, mostrando a porcentagem das diferentes fontes de energia.

Tabela 1 – Matriz Energética Brasileira.

Tipo		Capacidade Instalada Nº de Usinas	(kW)	%
Hidro		838	78.800.731	68,28
Gás	Natural	93	10.808.812	9,37
	Processo	33	1.252.483	1,09
Petróleo	Óleo Diesel	805	3.871.104	3,35
	Óleo Residual	25	2.030.403	1,76
	Bagaço de Cana	289	4.642.515	4,02
	Licor Negro	14	1.193.298	1,03
Biomassa	Madeira	37	315.767	0,27
	Biogás	9	44.672	0,04
	Casca de Arroz	7	31.408	0,03
Nuclear		2	2.007.000	1,74
Carvão Mineral	Carvão Mineral	9	1.530.304	1,33
Eólica		38	709.284	0,62
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46
	Argentina		2.250.000	2,17
	Venezuela		200.000	0,19
	Uruguai		70.000	0,07
Total		2.199	115.407.781	100

Fonte: Banco de Informações de Geração ANEEL (www.aneel.gov.br) [11].

Com uma malha de linhas de transmissão tão vasta para ligar as fontes produtoras de energia com os grandes centros, o correto dimensionamento de uma Torre de Transmissão de Energia Elétrica (TTEE), é primordial para manter o abastecimento energético no país.

Atualmente são utilizadas TTEE metálicas treliçadas. Com a crescente utilização desse tipo de torre, verificou-se um aumento de acidentes devido principalmente à incidência de ventos fortes.

Levando-se em conta o crescimento populacional e o aumento da demanda por energia elétrica, como podemos ver no gráfico da Figura 1, o colapso de uma TTEE poderá afetar a segurança ou possibilidade de socorro de pessoas, além de trazer prejuízos econômicos.

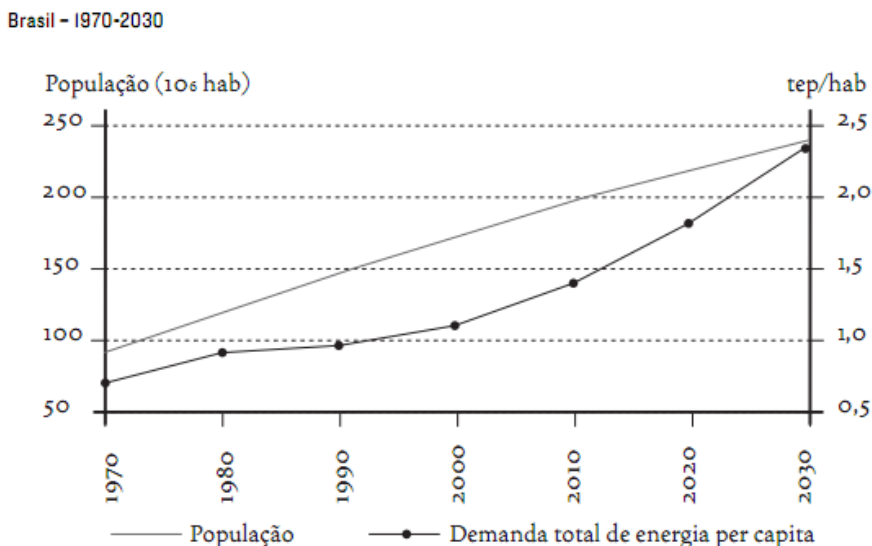


Figura 1 – Evolução do crescimento populacional e da demanda de energia per capita, [16].

Logo, de modo a não interrompermos o fornecimento de energia elétrica, as TTEE's deverão ser projetadas de forma a resistir aos esforços a que serão submetidas, como por exemplo, à incidência de ventos de alta intensidade.

Por estarmos tratando de estruturas metálicas treliçadas, esbeltas e de baixo peso, o vento representa o principal agente dentre os carregamentos considerados no projeto da TTEE's. Então, a correta estimativa do carregamento de vento com a região na qual a torre se localiza é de grande importância.

Contamos, atualmente, com duas normas da ABNT, as quais apresentam diretrizes para a estimativa de forças devidas a ação de vento em estruturas treliçadas. São elas:

a) **ABNT, NBR 5422:1985 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**

Esta norma fixa as condições básicas para o projeto de linhas áreas de transmissão de energia elétrica, projetos de reisolamento e/ou de reforma de linhas aéreas de transmissão.

b) **ABNT, NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações**

Esta norma fixa as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeitos de cálculo de edificações em geral.

As duas normas apresentam diferenças quanto à definição de velocidade básica de vento e procedimentos de cálculo das forças de vento nas partes componentes da torre (suporte, isoladores e cabos). Com isso, podem ocorrer gastos desnecessários na construção de TTEE's, ou até mesmo ocorrer um subdimensionamento que acarretará em um possível colapso da mesma devido a ventos menores que os previstos em projeto.

A escolha do local de análise do presente trabalho reflete essa diferença de velocidades básicas de vento: a região do Sul do Brasil, mais precisamente na região oeste de Santa Catarina.

O modelo de ação de vento adotado pelas normas de projeto atualmente em vigor refere-se aos ventos forte originados de ciclones extratropicais, também conhecidos por ventos sinóticos ou tormentas EPS (Extended Pressure System). Entretanto, ventos fortes podem ser originados por outros fenômenos meteorológicos, tais como tornados, tormentas elétricas e furacões, situações não contempladas nas normas brasileiras.

1.2. Histórico de Acidentes

Segundo Hatashita [10], “o parâmetro de maior interesse para a análise de confiabilidade das torres de linha de transmissão é a velocidade do vento”. Hatashita fez sua análise de confiabilidade da TTEE da COPEL, onde ocorreu a queda de uma torre de transmissão de energia no Paraná em 2003.



Figura 2 – Queda de torre de transmissão de energia no Paraná em 2003, Hatashita [10].

Nos dias 03 de junho e 16 de outubro de 2004 foram registradas interrupções na Linha de Transmissão 138kV Circuito Simples PCH Paraíso/Chapadão do Sul [7], causadas pelo colapso estrutural de torres durante fortes vendavais associados a chuvas de granizo.

Em Cascavel, no Paraná, tivemos quatro quedas de torres de transmissão em setembro de 2006 [9], e mais sete em agosto de 2011 [28].

No dia 14/06/2005, ventos com velocidade superior a 180 km/h derrubaram nove torres de duas das três linhas de transmissão em corrente alternada da usina de Itaipu [33]. As torres foram derrubadas a 60 quilômetros da cidade de Cascavel, no Paraná, e a 120 quilômetros de Foz do Iguaçu.

Holmes [25] atribui a queda de torres aos ventos *downburst* originados de tormentas elétricas. Esse tipo de vento age verticalmente (cima para baixo), sendo muito superior ao vento para o qual as torres são projetadas.

1.3. Objetivos e modelos utilizados

Os objetivos do presente trabalho podem ser assim descritos:

- 1) Efetuar uma comparação entre as forças de vento calculadas e aplicadas a uma torre LTEE segundo as normas NBR 5422 [1] e NBR 6123 [3];
- 2) Para a mesma torre utilizada no item 1) efetuar a verificação de segurança estrutural dos elementos mais solicitados;
- 3) Análise comparativa de resultados obtidos de dois modelos estruturais, conforme ilustra a Figura 3.

Utilizou-se como modelo a torre analisada nos trabalhos de Rodrigues [12], e posteriormente também analisada por Battista [29].

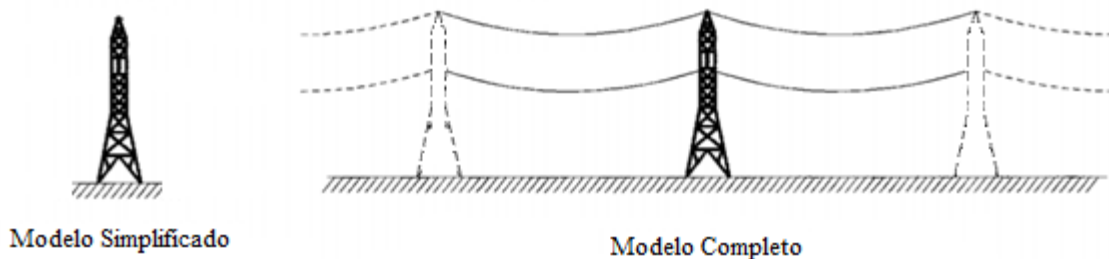


Figura 3 – Modelos estruturais.

- Modelo Simplificado – corresponde ao modelo numérico da torre isolada, na qual se aplicam as forças de vento atuantes nos cabos e na própria torre. As resultantes das forças de vento nos cabos condutores e pararraios são aplicadas em seus pontos de ancoragem na torre.
- Modelo Completo – modelo numérico de uma torre e dos cabos a ela ancorados nos vãos adjacentes.

Ambas as modelagens são em pórtico espacial. As análises dos modelos foram realizadas no programa comercial SAP2000 v.14 [30]. Para o modelo simplificado foi feita uma análise linear, pois seus deslocamentos são muito pequenos, enquanto que para o modelo completo foi realizada uma análise não linear geométrica, devido aos grandes deslocamentos proporcionados pela excursão lateral dos cabos.

1.4. Organização

Após a introdução presente no Capítulo 1, no Capítulo 2 são apresentados os procedimentos de cálculo da força devida à ação de vento em TTEE.

No Capítulo 3 são apresentadas as características físicas e geométricas da torre tipo Delta adotada no presente trabalho, assim como as cargas permanentes atuantes nos dois modelos.

São contemplados no Capítulo 4 os carregamentos atuantes na TTEE devidos a cada norma, considerando o modelo simplificado. Os valores calculados são comparados e considerações sobre as duas normas são feitas.

No Capítulo 5 o modelo completo é descrito.

No capítulo 6 são mostrados os resultados da análise do modelo simples e do modelo completo.

No Capítulo 7 os montantes da torre LTEE são verificados quanto à compressão, tração, flexão e combinação dessas ações.

No Capítulo 8 são apresentadas as considerações finais e sugestões para continuidade do trabalho, e no Capítulo 9 são apresentadas as referências bibliográficas segundo diretriz do Colegiado do Departamento de Estruturas, da UFRJ. Ao final, são apresentados os anexos pertinentes.

2. FORÇAS DEVIDAS À AÇÃO DO VENTO

Serão expostos a seguir os procedimentos segundo as NBR 5422 [1] e NBR 6123 [3] para o cálculo das forças devidas à ação do vento em torres de linha de transmissão.

Essas normas consideram a ação de ventos originados de ciclones extratropicais, ventos esses caracterizados como “bem comportados” e que podem ser descritos em função do tempo como a soma de uma parcela média em um longo intervalo e outra parcela flutuante aleatória (Blessmann [26]). Esta última parcela decorre dos turbilhões no escoamento que produzem as rajadas, as quais variam de um ponto a outro. Quanto maior a velocidade de uma rajada, tanto menor será sua duração e o turbilhão que a originou. As rajadas mais intensas, que são de curta duração, têm dimensões reduzidas e atingem as estruturas parcialmente dependendo das suas dimensões. Quanto maior a estrutura, maior deve ser o turbilhão para que ele aplique uma ação global sobre a estrutura. A velocidade de vento para o projeto de uma estrutura deve ser tomada como uma média em um certo intervalo de tempo função das dimensões do turbilhão que irá envolvê-la como um todo. Além disso, a velocidade de vento de projeto é definida em função de outros fatores, tais como: altura acima do terreno, tipo do terreno e margem de segurança requerida para o projeto.

2.1. Procedimento segundo NBR 5422

Para a determinação da pressão dinâmica de referência, q_0 , e das forças de vento sobre os cabos, isoladores e torre (suporte) é necessário o cálculo da velocidade de vento de projeto, V_p . Seu cálculo é obtido pela equação (2-1) para uma altura $H(m)$ acima do terreno:

$$V_p = K_r \cdot K_d \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{1/n} \cdot V_b \quad (\text{m/s}) \quad (2-1)$$

onde V_b é a velocidade básica de vento e K_r , K_d e n são fatores para ajuste de V_b em função da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo associado às dimensões da rajada a ser utilizada.

A Figura 4 apresenta a velocidade básica de vento V_b , em m/s, em todo o território brasileiro. Esta velocidade refere-se às seguintes condições:

- Altura $z(m)$ a partir do solo de 10 metros;
- Categoria B do terreno;
- Tempo de integração igual a 10 minutos;
- Período de retorno de 50 anos.

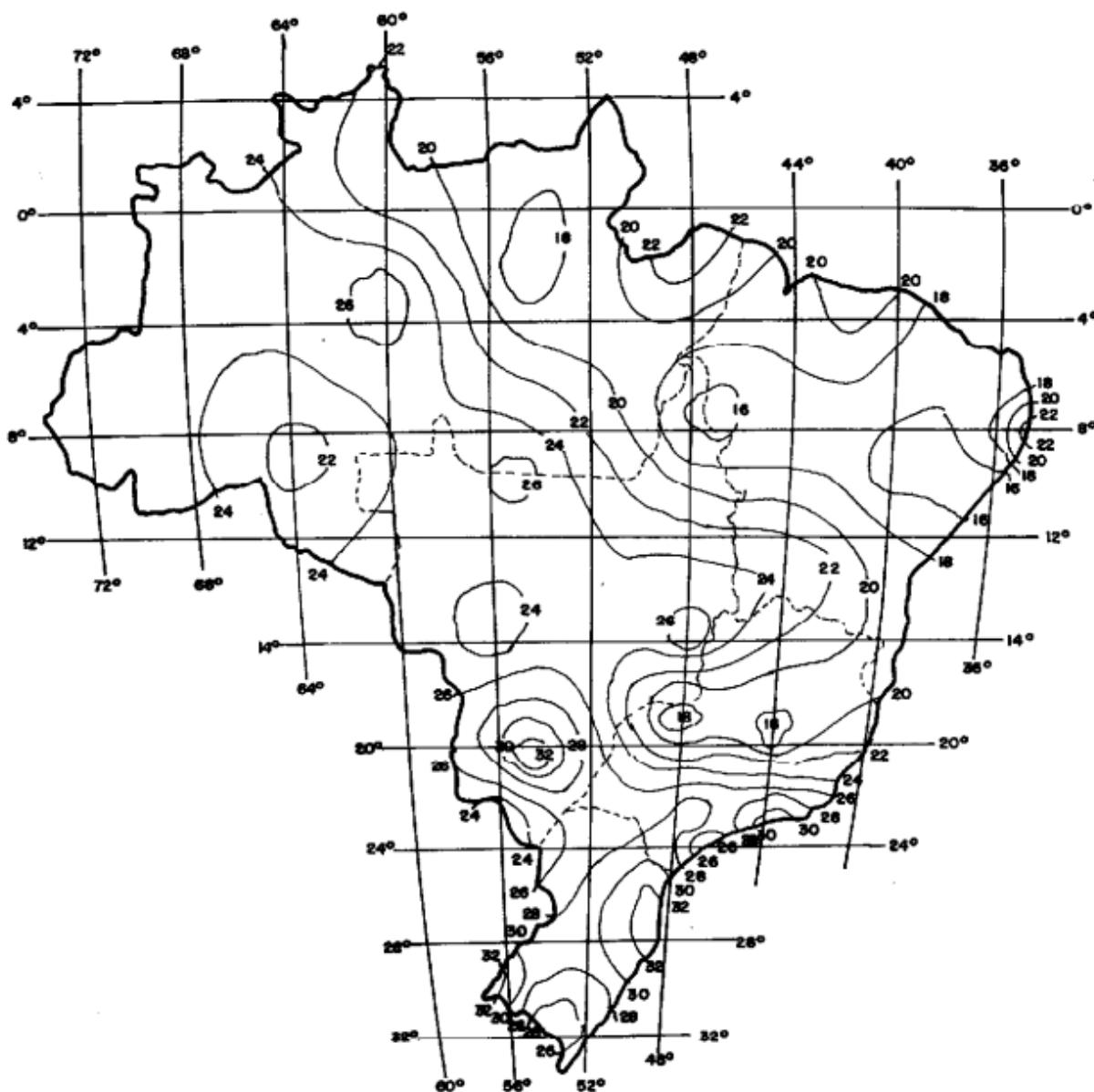


Figura 4 – Mapa de velocidade básica de vento V_b (m/s) [1].

Para ajustar a velocidade básica às condições do projeto utilizam-se os coeficientes K_r , K_d e n .

Na Tabela 2 temos os coeficientes de rugosidade K_r de acordo com a categoria do terreno. A velocidade e a turbulência do vento dependem da rugosidade do terreno, quanto maior a rugosidade, mais turbulento é o vento e menor sua velocidade média ao longo da altura.

Tabela 2 – Coeficientes de Rugosidade do Terreno [1].

Categoria do terreno	Características do terreno	Coeficiente de rugosidade K_r
A	Vastas extensões de água; áreas planas costeiras; desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0,85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas	0,67

Para regiões com rugosidade intermediária, K_r pode ser interpolado.

A Figura 5 apresenta o fator K_d em função do período de integração e da rugosidade de terreno.

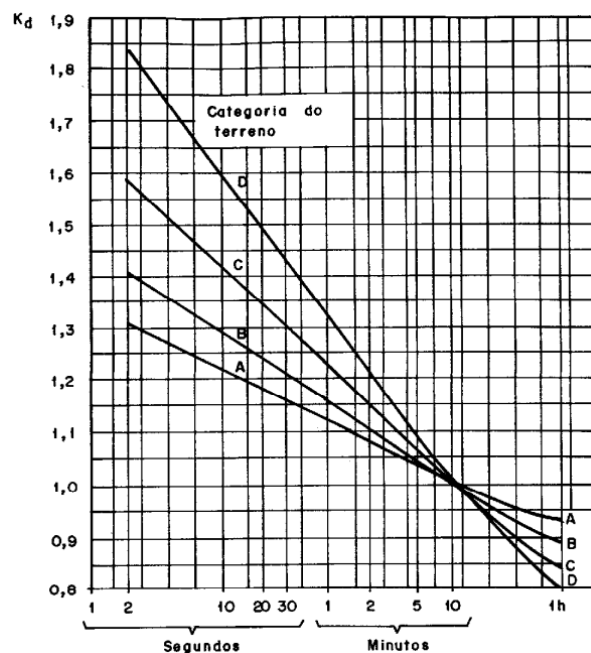


Figura 5 - Relação entre as velocidades médias a 10m de altura, NBR 5422 [1].

A NBR 5422 [1], no seu item 4.8.5, recomenda a adoção de um período de integração de 2 segundos para a ação do vento nos suportes e nas cadeias de isoladores, e adoção de 30 segundos para a ação do vento nos cabos. A adoção de um período de retorno de 50 anos é o valor mínimo para as cargas de vento utilizadas no dimensionamento mecânico dos suportes.

A Tabela 3 fornece os valores de n , que dependem da rugosidade do terreno e do período de integração t . Na equação (2-1) faz-se o ajuste da velocidade básica para a altura $H(m)$ de acordo com a chamada lei potencial do perfil de velocidades médias de vento.

Tabela 3 – Valores de n para correção da velocidade de vento em função da altura [1].

CATEGORIA DO TERRENO	n	
	$t = 2 \text{ s}$	$t = 30 \text{ s}$
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

A carga devida ao vento é calculada em função de uma pressão dinâmica de referência, obtida de acordo com a equação (2-2), sendo o valor de massa específica do ar ρ a ser utilizada segundo prescrição desta norma dado pela equação (2-3):

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_p^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (2-2)$$

$$\rho = \frac{1,293}{1+0,00367 \cdot T} \cdot \left(\frac{16000+64 \cdot T - ALT}{16000+64 \cdot T + ALT} \right) \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-3)$$

onde:

T = temperatura coincidente, em °C. Sendo o valor considerado como média das temperaturas mínimas diárias e suposto coincidente com a ocorrência da velocidade do vento de projeto;

ALT = altitude média da região de implantação da linha, em metros.

A força A_c no suporte (torre) devida à ação de vento em um cabo de vão com comprimento z (m) é dada pela equação (2-4). Esta deve ser aplicada perpendicularmente ao cabo no seu ponto de fixação em cada suporte.

$$A_c = q_0 \cdot C_{\chi c} \cdot \alpha \cdot d \cdot \frac{z}{2} \cdot \text{sen}^2 \theta \text{ (N)} \quad (2-4)$$

onde:

q_0 = pressão dinâmica de referência, previamente calculada;

$C_{\chi c}$ = coeficiente de arrasto, igual a 1,0;

d = diâmetro do cabo, em metros;

z = comprimento do vão considerado, em metros;

θ = ângulo de incidência do vento ($\leq 90^\circ$) em relação à direção do vão;

α = fator de efetividade, adimensional.

O valor do fator de efetividade α pode ser determinado a partir do gráfico da Figura 6. Ele é função do vão dos cabos e da categoria do terreno. Seus valores são válidos para um período de integração menor ou igual a 30 segundos.

Para torres que suportam feixes de cabos, deve-se considerar a ação resultante como a somatória das cargas atuantes em cada cabo isolado do feixe sem considerar efeito de blindagem.

A velocidade de projeto deverá ser corrigida para a altura média dos cabos em relação ao solo ao longo do vão.

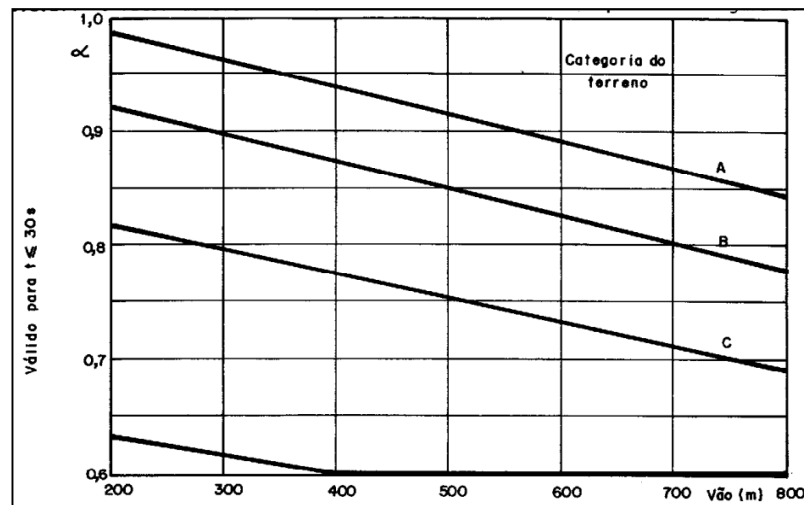


Figura 6 – Fator de efetividade α [1]

A força decorrente da ação do vento sobre os isoladores, aplicado na direção do vento no ponto de suspensão da cadeia dos isoladores é dado pela equação (2-5), sendo que a velocidade de vento deve ser corrigida para a altura do centro de gravidade da cadeia de isoladores.

$$A_i = q_0 \cdot C_{\chi i} \cdot S_i \text{ (N)} \quad (2-5)$$

onde:

q_0 = pressão dinâmica de referência, previamente calculada;

$C_{\chi i}$ = coeficiente de arrasto, igual a 1,2;

S_i = área de cadeia de isoladores, projetada ortogonalmente sobre um plano vertical, em m^2 .

Para a ação de vento no suporte, decompomos o mesmo em trechos denominados troncos de comprimento máximo de 10 metros. A velocidade do vento deve ser corrigida para a altura do centro de gravidade de cada tronco. Os troncos adotados no modelo serão vistos posteriormente.

Para suportes metálicos treliçados de seção transversal retangular, a força devido à ação de vento em cada tronco será dada pela equação (2-6).

$$A_t = q_0 \cdot (1 + 0,2 \cdot \sin^2 2\theta) \cdot (S_{T1} \cdot C_{\chi T1} \cdot \sin^2 \theta + S_{T2} \cdot C_{\chi T2} \cdot \cos^2 \theta) \text{ (N)} \quad (2-6)$$

onde:

q_0 = pressão dinâmica de referência, previamente calculada;

$\theta = 90^\circ$ perpendicularmente ao eixo da linha;

S_{T1}, S_{T2} = área líquida total de uma face projetada ortogonalmente sobre plano vertical situado na direção das faces 1 e 2, respectivamente, em m^2 ;

$C_{\chi T1}, C_{\chi T2}$ = coeficiente de arrasto próprio das faces 1 e 2, para um vento perpendicular a cada face, tomado conforme Figura 7, em função do parâmetro Φ , já levando em conta as faces a sotavento e a barlavento;

Φ = relação entre área líquida e área bruta das cantoneiras.

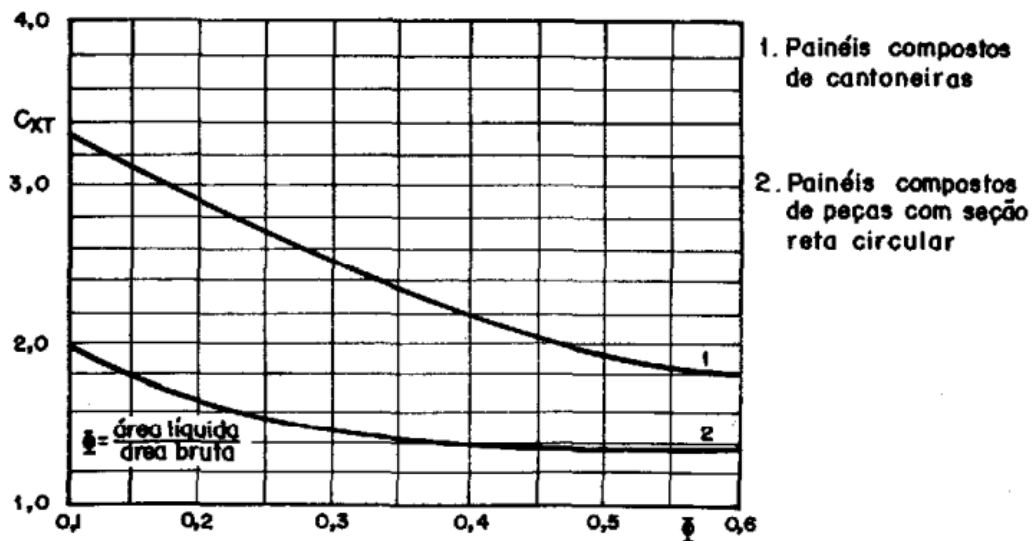


Figura 7 – Coeficiente de arrasto para painéis de suportes treliçados [1].

2.2. Procedimento segundo NBR 6123

Para a determinação da pressão dinâmica (q) devida à ação do vento, equação (2-7), é necessário determinar a velocidade característica de vento.

$$q = 0,613 \cdot V_K^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (2-7)$$

Esta equação é idêntica a equação (2-2), considerando apenas o valor de ρ igual a 1,225 kg/m³ referente ao nível do mar (pressão atmosférica de 1atm) e temperatura de 15°C. Temos então uma pressão dinâmica mais conservadora por não considerar os efeitos da altitude e temperatura na massa específica do ar.

A velocidade característica do vento V_k determinada pela equação (2-8), depende da velocidade básica de vento retirada da Figura 8. Nela está representado o mapa das isopletas do território brasileiro, considerando uma rajada de 3 segundos, a 10 metros acima do solo em campo aberto e plano, com um período de retorno de 50 anos.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \text{ (m/s)} \quad (2-8)$$

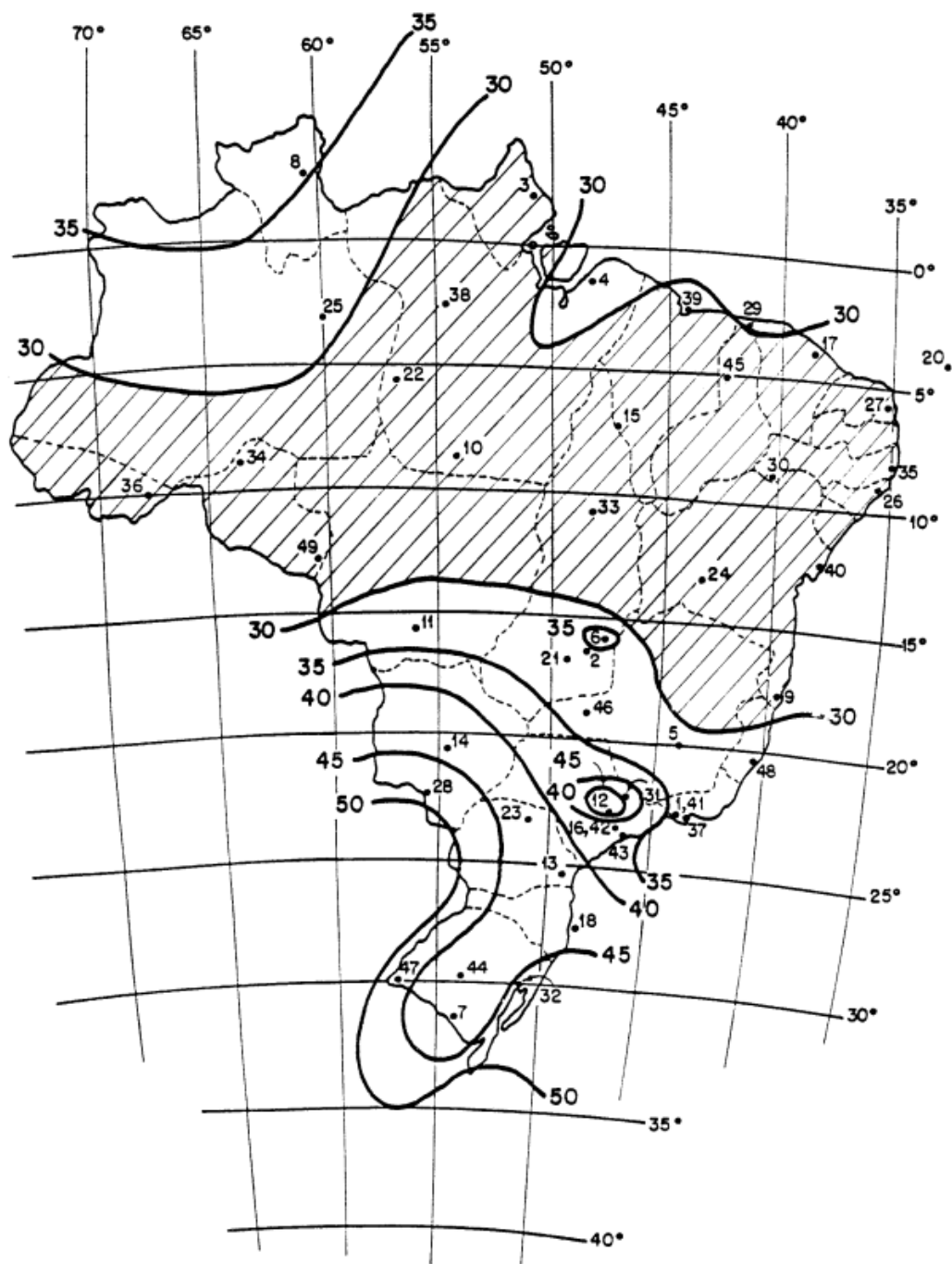


Figura 8 – Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s), NBR 6123 [3]

O fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do terreno. Para terreno plano ou fracamente acidentado, é recomendado que S_1 seja considerado igual a 1,0.

O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração.

Para fins dessa Norma, a rugosidade do terreno é definida em cinco categorias e a edificação é dividida em três classes, A, B e C, com dimensões máximas inferiores a 20 metros, entre 20 e 50 metros e acima de 50 metros, respectivamente. Trabalharemos na categoria II e classe B para o suporte.

A NBR 6123 [3] fornece a equação (2-9) para o cálculo do fator S_2 em uma altura $z(m)$ acima do nível geral do terreno. Uma vez definidas as classes e as categorias do terreno chega-se ao fator S_2 ,

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (2-9)$$

onde,

F_r é o fator de rajada;

b e p são parâmetros relacionados à rugosidade do terreno.

Para determinar o fator S_2 para condutores e pararraios, devemos recorrer ao Anexo A da NBR 6123 [3].

O procedimento de cálculo para determinar o intervalo de integração para cabos condutores e cabos pararraios em função dos seus comprimentos está descrito no Anexo A do texto. Trata-se de um processo iterativo baseado na equação (2-10), onde se busca através de um valor arbitrado inicial determinar o fator S_2 . Ao final do processo iterativo, com o valor do tempo $t(s)$, pode-se determinar os parâmetros b , F_r , e p , para o cálculo do fator S_2 .

$$t = \frac{7,5L}{V_t} \quad (2-10)$$

Para o comprimento $L(m)$ dos cabos, o intervalo de tempo $t(s)$ selecionado e a velocidade de projeto $V_k(m/s)$ devem atender a equação (2-10).

O fator de rajada F_r é sempre referente à categoria II. A equação (2-9) é aplicável até a altura $z_g(m)$, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros Meteorológicos [3].

Categoria	z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

O fator estatístico S_3 é baseado em nível de probabilidade de 63% de que a velocidade básica de projeto seja igualada ou excedida em um período de retorno de 50 anos (vida útil de 50 anos). A Tabela 5 fornecida pela NBR 6123 [3] indica valores mínimos do fator S_3 .

Tabela 5 – Valores mínimos do fator estatístico S_3 [3].

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Para o caso de linhas de transmissão consideraremos o fator S_3 igual a 1,10, por considerarmos que, após uma tempestade destrutiva, sua ruína total ou parcial poderá afetar a segurança ou a possibilidade de socorro a pessoas.

Segundo a NBR 6123 [3], para fios e cabos, a componente perpendicular ao cabo da força de arrasto é calculada pela equação (2-11).

$$F_y = C_a \cdot q \cdot l \cdot d \cdot \sin^2 \alpha \quad (2-11)$$

onde,

F_y = Força de arrasto perpendicular a fios e cabos;

C_a = Coeficiente de arrasto, conforme Tabela 6;

q = pressão dinâmica, previamente determinada;

l = comprimento do fio ou cabo, em metros;

d = diâmetro do fio ou cabo, em metros;

α = ângulo que o vento forma com a corda ou cabo.

A tabela abaixo mostra os valores dos coeficientes de arrasto, que dependem do valor do número de Reynolds (Re).

Tabela 6 – Coeficientes de arrasto, C_a , para fios e cabos com $l/d > 60$ [3].

Regime do fluxo ($Re = 70000 V_k d$) [V_k em m/s; d em m]	Coeficiente de arrasto C_a para:			
	Fio liso	Fio moderadamente liso (galvanizado) ou pintado)	Cabos torcidos de fios finos $r'/d \leq 1/30$	Cabos torcidos de fios grossos $r'/d \geq 1/25$
$Re \leq 2,5 \cdot 10^4$	-	-	1,2	1,3
$Re \geq 4,2 \cdot 10^4$	-	-	0,9	1,1
$Re \leq 2,5 \cdot 10^5$	1,2	1,2	-	-
$Re \geq 4,2 \cdot 10^5$	0,5	0,7	-	-
Para Re e r'/d intermediários, os valores de C_a são obtidos por interpolação				

onde,

r' = raio dos cabos secundários da camada externa do cabo;

d = diâmetro do círculo circunscrito da seção do cabo;

l = comprimento do cabo.

onde o número de Reynolds é dado pela equação (2-12).

$$Re = 70000 \cdot d \cdot V_k \quad (2-12)$$

onde,

d = diâmetro dos cabos, em metros;

V_k = velocidade característica, dada pela multiplicação da velocidade básica de vento pelos fatores S_1 , S_2 e S_3 , em m/s.

A força de arrasto F_a do vento atuante sobre uma torre reticulada pode ser calculada conforme a equação (2-13)

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (2-13)$$

onde,

q = pressão dinâmica, previamente determinada;

A_e = área frontal efetiva de uma das faces da torre reticulada: área da projeção ortogonal das barras de uma das faces da torre reticulada sobre um plano paralelo a esta face, em m²;

C_a = coeficiente de arrasto para vento perpendicular a torre reticulada, conforme Figura 9, em função de \emptyset ;

\emptyset = Razão entre área líquida e área bruta dos troncos da torre reticulada.

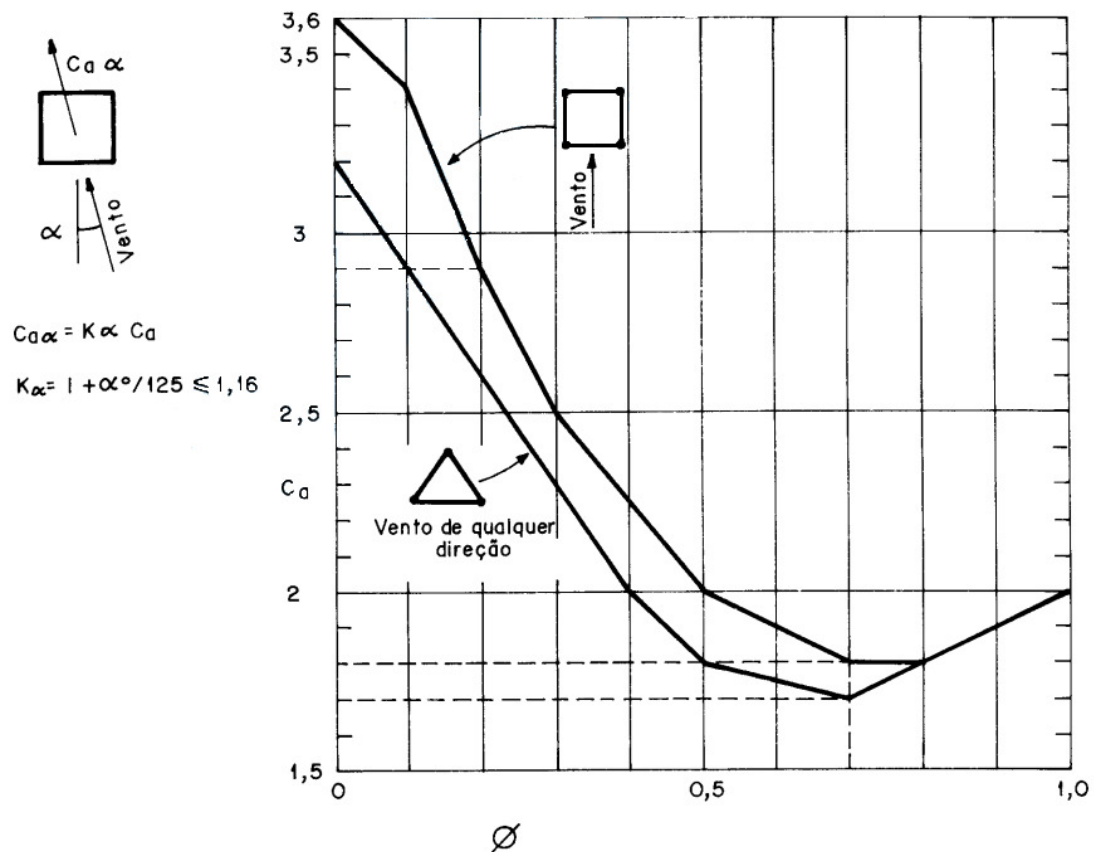


Figura 9 – Coeficiente de arrasto, C_a , para torres reticuladas de seção quadrada e triangular eqüilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondadas [3].

Para o cálculo das cargas de vento nas cadeias de isoladores utilizaremos as prescrições do item 7.3 da NBR 6123 [3], para barras prismáticas de seção circular. Segundo esse item, a força de arrasto é calculada pela equação (2-14).

$$F_a = C_a \cdot q \cdot K \cdot l \cdot d \quad (2-14)$$

onde,

C_a = coeficiente de arrasto, que depende do número de Reynolds, conforme Tabela 8;

q = pressão dinâmica, previamente determinada;

l = comprimento da cadeia de isoladores, em metros;

d = diâmetro da cadeia de isoladores, em metros;

K = fator que depende da relação l/C_a , conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Valores do fator de redução, K, para barras de comprimento finito [3].

l/c_a ou l/d	2	5	10	20	40	50	100	∞
Barras prismáticas de seção circular em regime subcrítico ($Re < 4,2 \cdot 10^5$)	0,58	0,62	0,68	0,74	0,82	0,87	0,98	1,0
Barras prismáticas de seção circular em regime acima do crítico ($Re \geq 4,2 \cdot 10^5$)	0,80	0,80	0,82	0,90	0,98	0,99	1,0	1,0
Barras prismáticas de faces planas	0,62	0,66	0,69	0,81	0,87	0,90	0,95	1,0

Segundo essa mesma norma, quando ambos os extremos da barra prismática são obstruídos, a relação l/C_a , deve ser considerada infinita, levando a $K = 1,0$, independente do número de Reynolds.

Tabela 8 – Coeficientes de arrasto, C_a , para barras prismáticas de seção circular e de comprimento infinito [3].

Regime de fluxo ($Re = 70000 V_k d$) [V_k em m/s; d em m]		C_a
Subcrítico	$Re < 4,2 \cdot 10^5$	1,2
Acima do crítico	$4,2 \cdot 10^5 \leq Re < 8,4 \cdot 10^5$	0,6
	$8,4 \cdot 10^5 \leq Re < 2,3 \cdot 10^6$	0,7
	$Re \geq 2,3 \cdot 10^6$	0,8

3. MODELO TORRE TIPO DELTA

3.1. Torre Autoportante Tipo Delta

A justificativa para o emprego de uma estrutura treliçada torre tipo Delta é a grande dificuldade de acesso à maioria dos locais de implantação das linhas, exigindo que os projetos de montagem apresentem facilidades de transporte de peças isoladas ou de pequenos módulos pré-fabricados.

As ligações adotadas são do tipo parafusado (parafusos galvanizados), sendo três parafusos por aba nos elementos montantes e dois parafusos em cada aba nos elementos diagonais.



Figura 10 – Detalhe de ligação das cantoneiras (www.alibaba.com) [28].

Serão utilizados perfis tipo cantoneira com padrão em polegadas.

A escolha do perfil tipo cantoneira para diagonais e montantes é justificada porque ele trabalha bem à tração e à compressão, e as abas desses perfis facilitam os detalhes das ligações parafusadas e a aplicação de proteção superficial.

O modelo estrutural adotado para a análise estática representa dois vãos adjacentes de condutores e pararraios em nível, suspensos por torres de mesma altura e silhueta, conforme Figura 11.

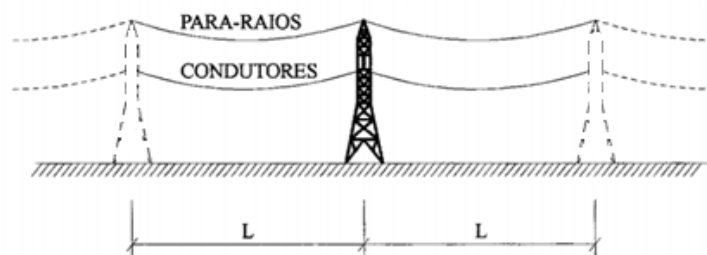


Figura 11 – Esquema estrutural adotado para análise (adaptado de Rodrigues [12]).

Conforme dito anteriormente, será utilizado um modelo simplificado e um modelo completo. As torres extremas no modelo completo, bem como os trechos condutores e pararraios têm suas características acopladas ao modelo na definição das condições de contorno cinemáticas, elásticas e inerciais.

3.1.1. Ligação dos condutores elétricos

Segundo Battista [29], o tipo de isolador mais adotado no Brasil é o de disco, composto de um corpo isolador de porcelana ou de vidro, com ferragens necessárias à montagem. Já os isoladores poliméricos são há algum tempo especificados em novos projetos de linhas de transmissão, pela sua resistência ao vandalismo e por serem mais leves (Figura 12).

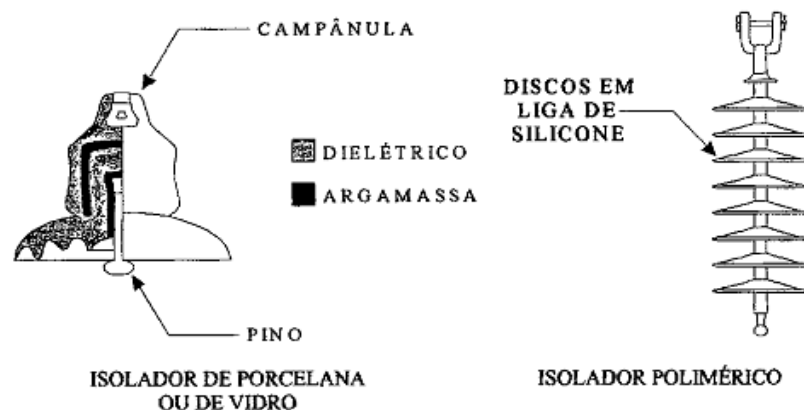


Figura 12 – Isoladores de disco, Battista [29].

Os isoladores são conectados em série, formando cadeias de isoladores que, mecanicamente, funcionam como bielas de suspensão dos cabos condutores. O número de isoladores utilizados determina o comprimento das bielas.

Na Figura 13 é possível ver que sua fixação se dá através de um olhal fixado ao isolador do topo da cadeia e conectado à torre, com auxílio de um estribo.

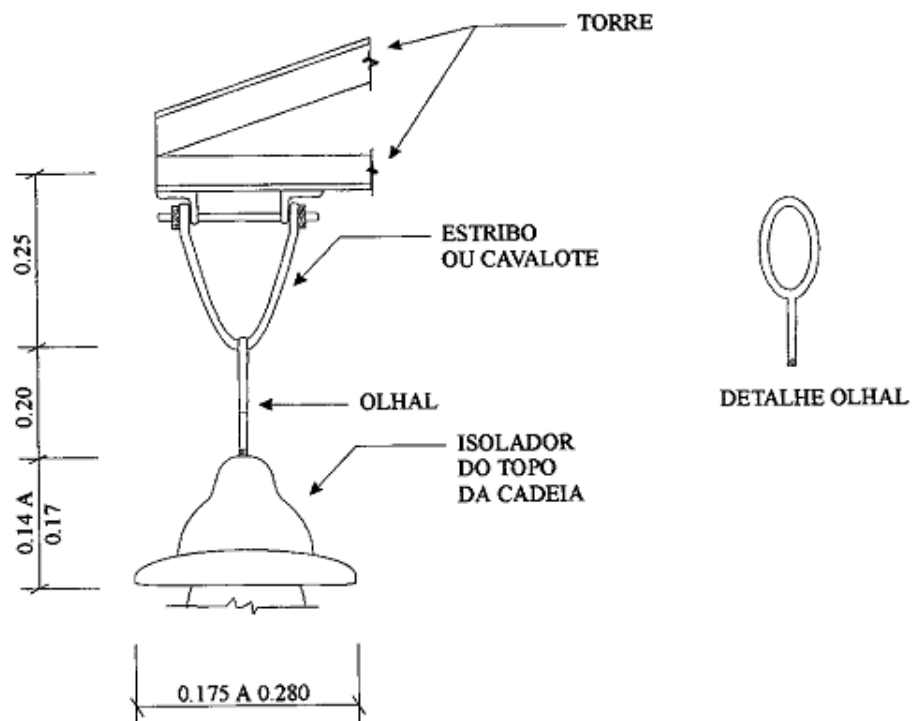


Figura 13 – Detalhe de fixação das bielas de suspensão, cotas em metros, Battista [29].

3.1.2. Ligação dos pararraios

Os pararraios são fixados às torres LTEE por grampos instalados na parte mais alta do suporte, segundo Battista [29]. Na Figura 14 é possível ver o detalhe da ligação.

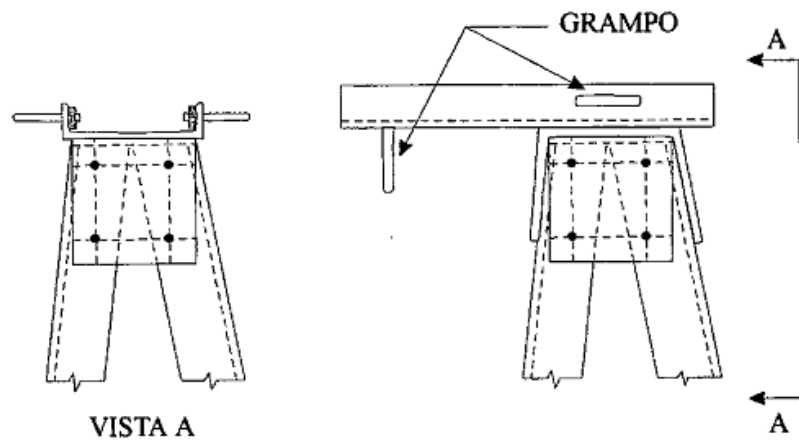


Figura 14 – Detalhe da ligação dos pararraios, Battista [29].

3.1.3. Descrição do modelo da torre, segundo Rodrigues [12]

A torre é classificada como sendo do tipo suspensão, em alinhamento reto e com vão médio máximo de 450m (Figuras 15 e 16);

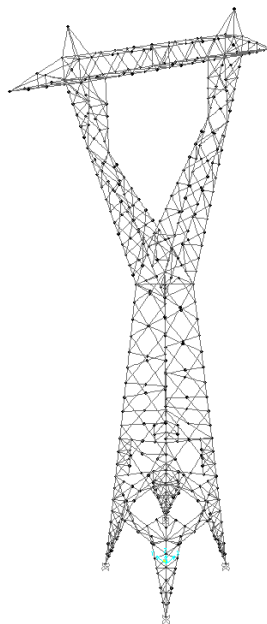


Figura 15 – Isométrico da torre treliçada de suporte, Rodrigues [12].

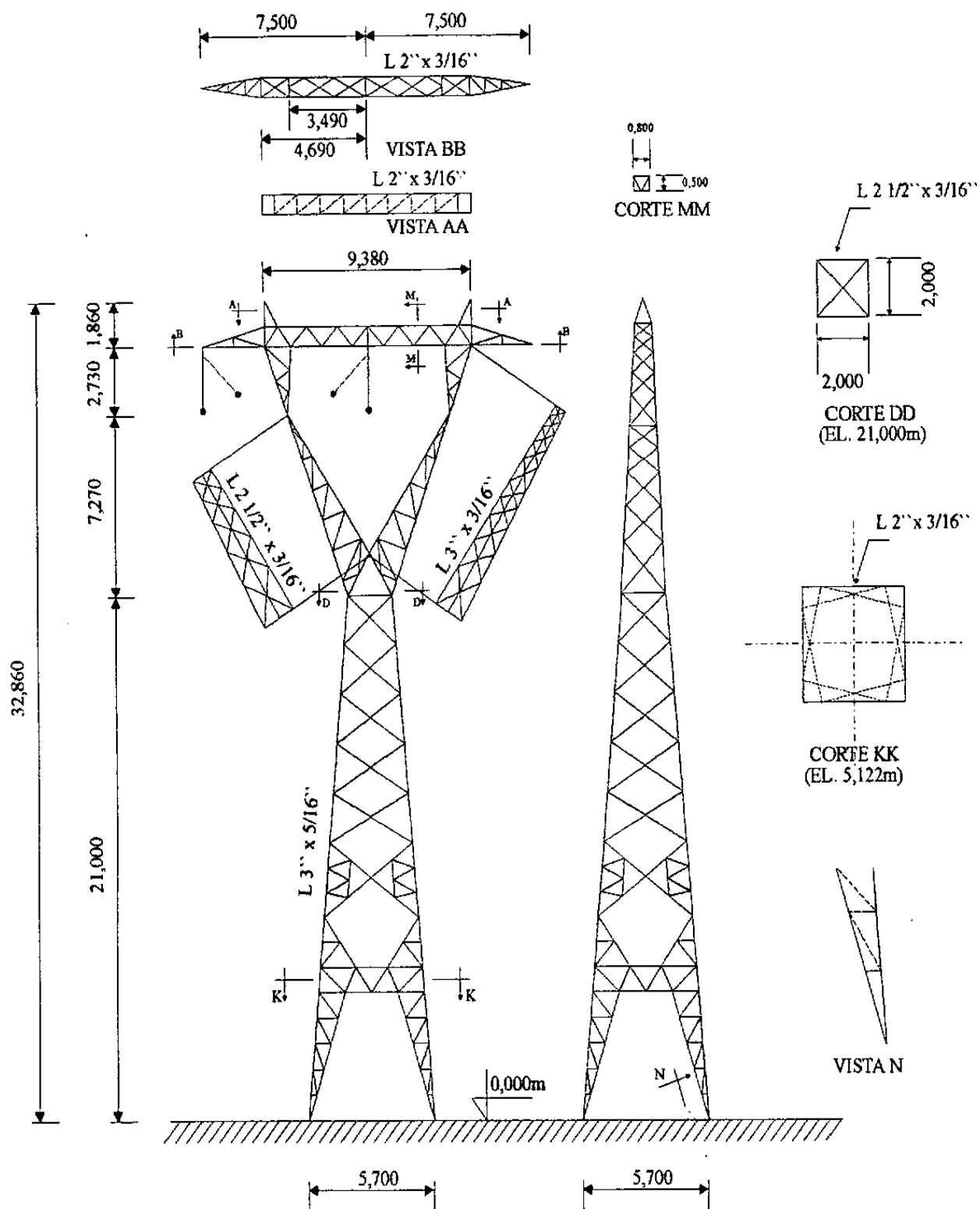


Figura 16 – Silhueta da torre delta (dimensões em metros), Rodrigues [12].

Material:

Aço Carbono ASTM A36 e Aço de Alta Resistência ASTM A572.

Seções Transversais:

Perfil tipo cantoneira de abas iguais, padrão em polegadas

- Tronco da torre (EL. 0,00m a EL. 21,00m)
Montantes: L 3" x 5/16" ASTM A36 – 84 elementos
Travejamento: L 2 ½" x 3/16" ASTM A36 – 146 elementos
 L 2" x 3/16" ASTM A 36 – 108 elementos
 L 1 ½" x 1/8" ASTM A36 – 132 elementos
 L 1 ¾" x 1/8" ASTM A36 – 8 elementos
- Delta (EL. 21,00m a EL. 32,86m)
Montantes: L 2 ½" x 3/16" ASTM A36 – 40 elementos
 L 3" x 3/16" ASTM A572 – 72 elementos
 L 1 ¾" x 3/16" ASTM A36 – 16 elementos
Travejamento: L 3" x 3/16" ASTM A572 – 8 elementos
 L 1 ½" x 1/8" ASTM A 36 – 168 elementos
 L 1 ½" x 1/8" ASTM A36 – 4 elementos

Viga:

- Banzos: L 2 ½" x 3/16" ASTM A36 – 16 elementos
 L 2" x 3/16" ASTM A 36 – 44 elementos
- Travejamento : L 2 ½" x 3/16" ASTM A36 – 16 elementos
 L 1 ½" x 1/8" ASTM A 36 – 60 elementos
 L 1 ¾" x 3/16" ASTM A36 – 18 elementos
 L 1 ½" x 1/8" ASTM A 572 – 48 elementos
- Travejamento horizontal EL. 5,122 m
 L 1 ½" x 1/8" ASTM A36 – 8 elementos
 L 1 ¾" x 3/16" ASTM A36 – 4 elementos
 L 1 ¾" x 1/8" ASTM A572 – 24 elementos
- Travejamento horizontal EL. 21,0m
 L 1 ¾" x 1/8" ASTM A36 – 4 elementos

3.1.4. Descrição dos Cabos

➤ Cabos Condutores

Condutores elétricos de alumínio com alma de aço CAA 636MCM-26/7
Grosbreak

Diâmetro: 21,9mm

Peso próprio: 13 N/m

Tração Máxima: 31500 N

➤ Cabos Pararraios

Especificação: Cordoalha de 7 fios de aço galvanizado EHS3/8"

Diâmetro: 9,15mm

Peso Próprio: 4,07 N/m

Tração Máxima: 14700 N

3.1.5. Descrição dos Isoladores

Altura da cadeia: 2,65m

Peso Próprio: 1000 N

Considerando o estribo de ligação com a torre, a altura da biela de suspensão adotada, segundo Rodrigues [12], resulta em $h = 2,90\text{m}$ (Figura 17).

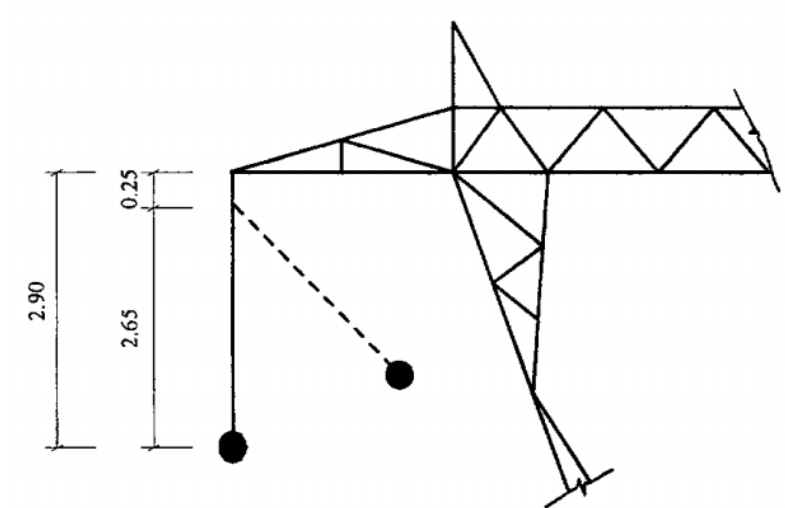


Figura 17 – Detalhe da biela de suspensão (cota em metros), Rodrigues [12].

3.1.6. Interação Solo-Estrutura e outras Condições de Contorno

O modelo computacional tridimensional foi modelado com base engastada.

3.2. Carga Permanente

A carga permanente será devida ao peso próprio da estrutura e seus componentes, mais a protensão (Rodrigues [12]).

➤ Cabos Condutores

A carga para os cabos condutores é de 5,86 kN.

➤ Cabos Pararraios

A carga dos cabos pararraios é de 1,71 kN.

➤ Isoladores

O peso próprio dos isoladores é de 1,0 kN.

➤ Peso próprio da torre treliçada

Calculado automaticamente pelo programa comercial SAP2000 v14 [30].

➤ Protensão

Para o modelo completo foram aplicadas nos elementos de cabos e isoladores as forças de tração pré-instaladas quando da montagem da estrutura, cujos valores estão relacionados a seguir, Battista [29]:

Cabos condutores = 31,4 kN

Pararraios = 14,8 kN

Isoladores = 9,86E-06 kN

4. Carregamentos devidos ao vento na torre delta, modelo simplificado

4.1. Carga de vento na torre

4.1.1. Divisão em módulos

A torre treliçada foi dividida em sete partes tronco-piramidais de altura inferior a 10 metros (Figura 18). A velocidade de projeto, como foi visto no item 2.1, deve ser calculada para o centróide de cada tronco. Para isso, o modelo computacional do SAP2000 v.14 [30] foi exportado para um programa CAD [6] a fim de facilitar a obtenção dos detalhes geométricos da torre treliçada, assim como o levantamento das áreas de projeção vertical bruta e líquida da estrutura para o cálculo dos coeficientes de arrasto.

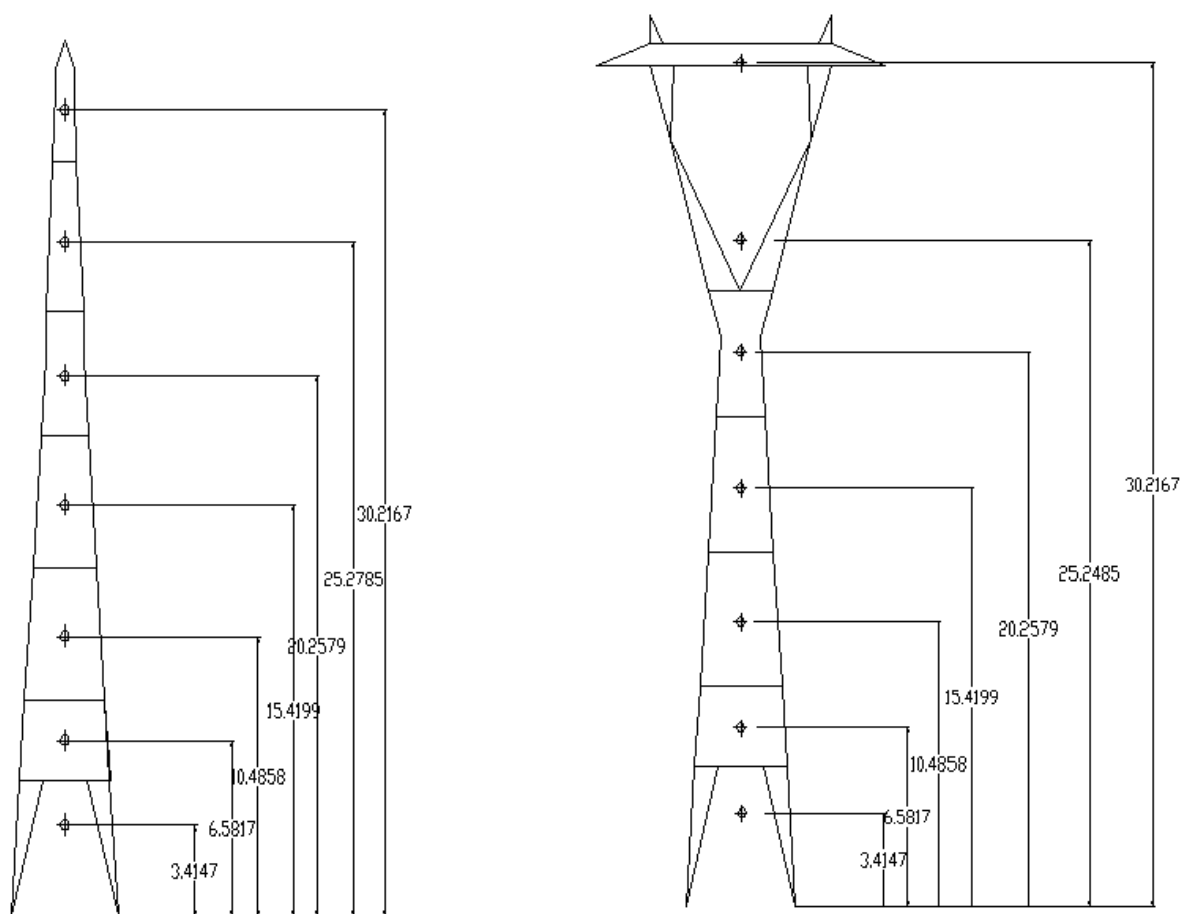


Figura 18 – Projeção dos troncos de pirâmide no plano vertical (cotas em metros), Battista [29].

4.1.2. Ação de vento na torre segundo NBR 5422 [1].

A região escolhida apresenta velocidade básica de vento de projeto, V_b , igual a 28 m/s, medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 10 minutos.

Será adotado K_r igual a 1,0, referente à categoria B.

Com o período de integração de 2 segundos para a ação de vento nos suportes, na categoria B, obtém-se, $K_d = 1,41$. O fator n , logo, será igual a 12.

Consideramos a altitude como no nível do mar ($ALT = 0$) e temperatura ambiente de 15°C, resultando em ρ igual a 1,225 kg/m³.

A tabela abaixo mostra os valores resumidos para cada módulo da estrutura, com várias informações, inclusive o valor da força de vento agindo sobre o módulo.

Tabela 9 – Carregamentos aplicados ao suporte segundo NBR 5422 [1] – $V_b = 28$ m/s; parâmetros definidos na equação (2-6).

Módulo	V_p (m/s)	q_0 (N/m ²)	ST1 (m ²)	ST2 (m ²)	ϕ_1	Cxt1	ϕ_2	Cxt2	At(N)
1	36,10	798,5	1,090	1,007	0,35	2,35	0,33	2,4	2044,7
2	38,13	890,8	1,860	2,313	0,14	3,18	0,17	3,05	5269,7
3	39,64	962,7	1,106	3,261	0,06	3,36	0,17	3,05	3578,2
4	40,93	1026,6	1,711	1,677	0,11	3,34	0,11	3,34	5865,6
5	41,87	1074,4	1,590	1,870	0,16	3,1	0,17	3,05	5295,6
6	42,65	1114,5	1,578	1,193	0,17	3,05	0,26	2,7	5364,4
7	43,29	1148,4	1,181	2,919	0,27	2,62	0,21	2,84	3552,9

4.1.3. Ação de vento na torre segundo NBR 6123 [3].

A região escolhida apresenta velocidade básica de vento, V_0 , igual a 50 m/s, medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 3 segundos.

O terreno é de categoria II e as dimensões do suporte se enquadram na Classe B.

O fator topográfico S_1 será considerado igual a 1,0.

O fator S_2 , que depende da altura de cada módulo, é calculado pela equação (2-9). O tempo de integração considerado foi de 5 segundos, considerando a torre com uma altura $H = 40\text{m}$.

Tomaremos o fator S_3 igual a 1,10, por considerarmos que, após uma tempestade destrutiva, sua ruína total ou parcial poderá afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas.

A Tabela 10 mostra os valores resumidos para cada módulo da estrutura, com várias informações, inclusive o valor da força de vento agindo sobre o suporte.

Tabela 10 – Carregamentos aplicados ao suporte segundo NBR 6123 [3] – $V_0 = 50 \text{ m/s}$; parâmetros definidos na equação (2-13).

Módulo	S_2	$V_k \text{ (m/s)}$	$q \text{ (N/m}^2\text{)}$	C_a	$A_e \text{ (m}^2\text{)}$	$F \text{ (N)}$
1	0,92	50,60	1569,5	2,38	1,090	4070,329
2	0,93	51,15	1603,8	3,25	1,860	9696,548
3	0,98	53,90	1780,9	3,50	1,106	6895,295
4	1,02	56,10	1929,2	3,42	1,711	11287,132
5	1,04	57,20	2005,6	3,23	1,590	10300,614
6	1,06	58,30	2083,5	3,21	1,578	10554,501
7	1,08	59,40	2162,9	2,70	1,181	6895,891

4.2. Carga de vento nos cabos

4.2.1. Ação de vento nos cabos segundo NBR 5422 [1].

A região escolhida apresenta velocidade básica de vento, V_b , igual a 28 m/s, medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 10 minutos.

Será adotado K_r igual a 1,0, referente à categoria B.

Com o período de integração de 30 segundos para ação de vento nos cabos, na categoria B, obtém-se, $K_d = 1,21$. O fator n , logo, será igual a 11.

Consideramos a altitude como no nível do mar ($ALT = 0$) e temperatura ambiente de 15°C.

A altura, $H(\text{m})$, para o cálculo da correção da velocidade para os cabos condutores é de 22,9m e para os cabos pararraios é de 28,4m.

O fator de efetividade α é igual a 0,86, de acordo com a Figura 6.

A Tabela 11 mostra os valores resumidos para cabos condutores e cabos pararraios, corrigidos para suas respectivas alturas.

Tabela 11 – Carregamentos aplicados aos cabos segundo NBR 5422 [1] – $V_b = 28$ m/s; parâmetro definido na equação (2-4).

Cabo	V_p (m/s)	q_0 (N/m ²)	C_{xc}	d (m)	A_c (kN)
Condutor	36,53	817,7	1	0,0219	3,48
Pararraio	37,25	855,8	1	0,0092	1,52

4.2.2. Ação de vento nos cabos segundo NBR 6123 [3]

A região escolhida apresenta velocidade básica de vento, V_0 , igual a 50 m/s, medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 3 segundos.

O terreno é de categoria II e as dimensões dos cabos se enquadram na Classe C.

O fator topográfico S_1 será considerado igual a 1,0.

Para edificações com dimensão horizontal ou vertical que exceda 80m, o intervalo de tempo correspondente poderá ser determinado de acordo com as indicações do Anexo A da NBR 6123 [3]. Os cálculos referentes aos cabos condutores e pararraios encontram-se no Anexo A deste trabalho, sendo o comprimento do vão $L = 450$ m.

Para os cabos condutores, o intervalo de integração calculado foi de 68 segundos e para cabos pararraios foi de 66,1 segundos, de acordo com a equação (2-10) e Anexo A deste trabalho.

A altura dos cabos para o cálculo da correção do fator S_2 para os cabos condutores é de 22,9m e para os cabos pararraios é de 28,4m.

Tomaremos o fator S_3 igual a 1,10, por considerarmos que, após uma tempestade destrutiva, sua ruína total ou parcial poderá afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas.

A Tabela 12 mostra os valores resumidos para cada módulo da estrutura, com várias informações, inclusive o valor da força de vento agindo sobre o cabo.

Tabela 12 – Carregamentos aplicados aos cabos segundo NBR 6123 [3] – $V_0 = 50$ m/s;
parâmetros definidos na equação (2-11) e Tabela 4.

Cabo	S_2	b	Fr	p	V_p (m/s)	q_0 (N/m ²)	Ca	d (m)	F (kN)
Condutor	0,90	1	0,813	0,126	49,63	1510,1	1	0,0219	14,88
Pararraio	0,93	1,00	0,815	0,126	51,35	1601,8	1	0,0092	6,66

4.3. Carga de vento nos isoladores

4.3.1. Ação de vento nos isoladores segundo NBR 5422 [1]

A região escolhida apresenta velocidade básica de vento, V_b , igual a 28 m/s, medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 10 minutos.

Será adotado K_r igual a 1,0, referente à categoria B.

Com o período de integração de 2 segundos para ação de vento nos isoladores, na categoria B, obtém-se, $K_d = 1,41$. O fator n, logo, será igual a 12.

Consideramos a altitude como no nível do mar ($ALT = 0$) e temperatura ambiente de 15°C.

A altura média dos isoladores, $H(m)$, é de 29,55m.

O comprimento dos isoladores é de $l = 2,9m$ e o diâmetro adotado foi de $d = 0,052m$, resultando em uma área $S_i = 0,07m^2$.

A força resultante de vento atuando nos isoladores é mostrada na Tabela 13.

Tabela 13– Carregamentos aplicados nos isoladores segundo NBR 5422 [1] – $V_b = 28$ m/s;
parâmetros definidos na equação (2-5).

	V_p (m/s)	q_0 (N/m ²)	Cxi	S_i (m ²)	A_i (kN)
Isoladores	43,21	1144,1	1,2	0,07	0,10

4.3.2. Ação de vento nos isoladores segundo NBR 6123

A região escolhida apresenta velocidade básica de vento, V_0 , igual a 50 m/s, medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 3 segundos.

O terreno é de categoria II e as dimensões do isolador se enquadram na Classe A.

O fator topográfico S_1 será considerado igual a 1,0.

Para o período de integração de 3 segundos para ação de vento nos isoladores, temos $S_2 = 1,1$.

A altura média dos isoladores, $H(m)$, é de 29,55m.

O comprimento dos isoladores é de $l = 2,9m$ e o diâmetro adotado foi de $d = 0,0525m$.

O fator K é igual a 1,0, pois seus extremos não são livres.

O coeficiente de arrasto C_a foi retirado da Tabela 8 e é igual a 1,2.

A força resultante de vento atuando nos isoladores é mostrada na Tabela 14.

Tabela 14 – Carregamentos aplicados nos isoladores segundo NBR 6123 – $V_0 = 50$ m/s

	V_p (m/s)	q_0 (N/m ²)	C_{xc}	$l \times d$ (m ²)	F_a (kN)
Isoladores	60,31	2229,4	1,2	0,07	0,20

4.4. Resumo comparativo das forças de vento

A Tabela 15 mostra um resumo comparativo dos carregamentos aplicados à torre segundo as NBR 5422 [1] e NBR 6123 [3], enquanto as Figuras 19 a 21 ilustram os pontos de aplicação destes esforços. Na torre, as forças resultantes de cada módulo estão distribuídas ao longo dos componentes principais.

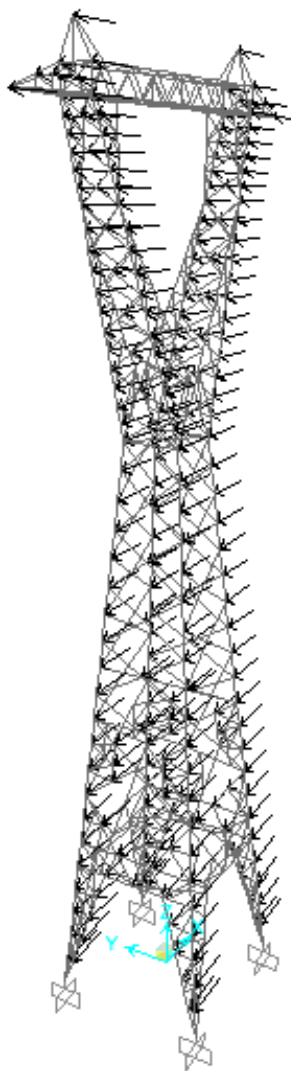


Figura 19 – Carregamento de vento aplicado no suporte (torre).

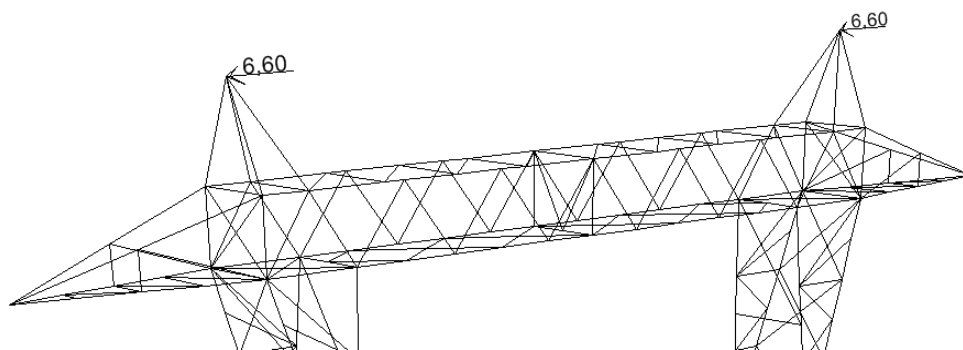


Figura 20 – Ponto de aplicação da força resultante de vento devido ao cabo pararraio, pela NBR 6123 [3] – $V_0 = 50$ m/s.

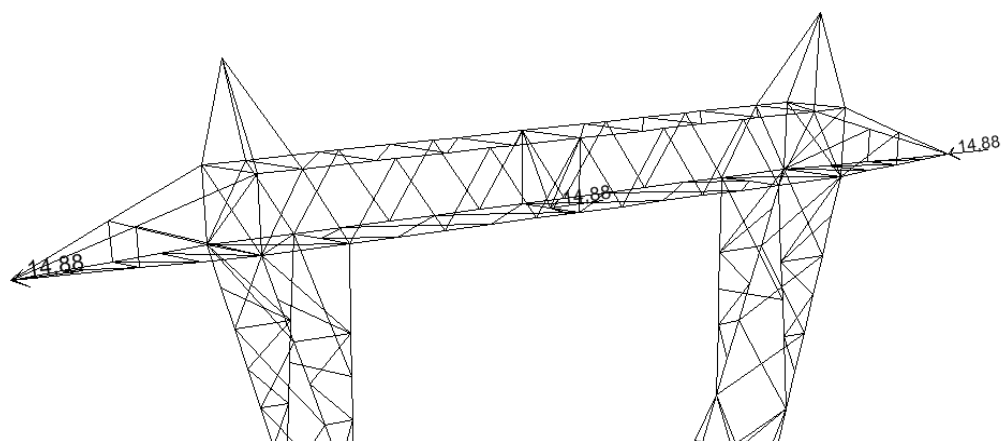


Figura 21 – Ponto de aplicação da força resultante de vento devido ao cabo condutor, pela NBR 6123 [3] – $V_0 = 50 \text{ m/s}$

Tabela 15– Comparação dos carregamentos segundo a NBR 5422 [1] e NBR 6123 [3].

ELEMENTO	Níveis	FORÇA (kN) NBR 5422 - $V_b=28 \text{ m/s}$	FORÇA (kN) NBR 6123 - $V_0=50 \text{ m/s}$	NBR 6123/ NBR 5422
CABOS CONDUTORES	Altura Média $z = 22,9 \text{ m}$	6,95	14,88	2,14
CABOS PARARRAIOS	Altura Média $z = 28,4 \text{ m}$	3,04	6,60	2,17
ISOLADORES	Ponto de Suspensão	0,10	0,20	2,00
MÓDULOS DA TORRE	1	2,04	4,07	1,99
	2	5,27	9,70	1,84
	3	3,58	6,90	1,93
	4	5,87	11,29	1,92
	5	5,30	10,30	1,95
	6	5,36	10,55	1,97
	7	3,55	6,90	1,94

Podemos observar que há uma grande diferença nos carregamentos aplicados à torre LTEE calculados segundo as normas NBR 5422 [1] e NBR 6123 [3], sendo as forças obtidas com a NBR 6123 [3] cerca do dobro das forças indicadas pela NBR 5422 [1].

Destaca-se inicialmente a diferença dos intervalos de tempo de rajada na definição das velocidades básicas das referidas normas. A Tabela 16 corrige o valor de V_b adotado (28 m/s) para o tempo de 3 segundos e também o valor de V_0 (50 m/s) para o tempo de 10 minutos. Enquanto que a NBR 5422 [1] faz a medida da velocidade básica V_b sobre uma média de 10 minutos, a NBR 6123 [3] apresenta uma média da velocidade básica V_0 em 3 segundos. É

importante salientar que em ambas as normas as velocidades básicas são tomadas a 10 metros sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano, com período de retorno de 50 anos.

Tabela 16– Valores de velocidade corrigidos de acordo com o intervalo de tempo.

t = 10 min	t = 3 s
$V_b = 28$ m/s (NBR 5422)	40,6 m/s
34,5 m/s	$V_0 = 50$ m/s (NBR 6123)

Nota-se claramente que há uma discordância dos dados referentes a uma mesma localidade, já que se chega a valores diferentes de velocidade básica referidas a um mesmo intervalo de tempo.

Um novo cálculo de forças devidas ao vento é apresentado na Tabela 17 agora com velocidades de vento compatíveis: $V_b = 38$ m/s para NBR 5422 [1] e $V_0 = 50$ m/s para a NBR 6123 [3].

Os cálculos desenvolvidos para obtenção da Tabela 16 podem ser vistos no ANEXO B.

O valor de $V_b = 38$ m/s foi obtido multiplicando-se o fator $S_3 = 1,1$, da NBR 6123 [3] por 34,5 m/s conforme correção apresentada na Tabela 16. As duas normas apresentam velocidades básicas associadas a período de retorno igual a 50 anos. No cálculo pela NBR 6123 multiplicou-se a velocidade básica pelo fator S_3 igual a 1,1, o qual corresponde ao aumento do período de retorno de 50 para 100 anos, na definição de V_0 . Para efeito de comparação das forças indicadas pelas duas normas fez-se o mesmo ajuste à velocidade V_b .

Tabela 17– Comparação dos carregamentos segundo a NBR 5422 [1] e NBR 6123 [3].

ELEMENTO	Níveis	FORÇA (kN) NBR 5422 - $V_b=38$ m/s	FORÇA (kN) NBR 6123 - $V_0=50$ m/s	NBR 6123/ NBR 5422
CABOS CONDUTORES	Altura Média $z = 22,9$ m	12,80	14,88	1,16
CABOS PARARAIOS	Altura Média $z = 28,4$ m	5,60	6,60	1,18
ISOLADORES	Ponto de Suspensão	0,18	0,20	1,11
MÓDULOS DA TORRE	1	3,77	4,07	1,08
	2	9,71	9,70	1,00
	3	6,59	6,90	1,05
	4	10,80	11,29	1,04
	5	9,75	10,30	1,06
	6	9,88	10,55	1,07
	7	6,54	6,90	1,05

Na Tabela 17 verifica-se uma boa correlação entre as forças de vento nos módulos da torre calculadas de acordo com as duas normas. Entretanto, para os cabos, as forças de vento obtidas da NBR 6123 são ainda 16% maiores do que as da NBR 5422.

A Tabela 18 apresenta os intervalos de integração para correção da velocidade de projeto associada a cada componente da LTEE, de acordo com cada norma (para os cabos 30 segundos para NBR 5422 e 68 segundos para NBR 6123). Para um mesmo modelo de cálculo das forças nos cabos, a consideração de um intervalo de tempo maior conduz a uma força menor. Todavia, não é o que se vê na Tabela 17, já que a força nos cabos dada pela NBR 6123 [3] é 1,16 vezes maior que a da NBR 5422 [1], apesar do intervalo de tempo adotado pela primeira norma ser maior do que o correspondente valor da segunda.

O fator de efetividade da NBR 5422, neste caso tomado igual a 0,86, é o principal responsável pela diferença encontrada nos valores de forças nos cabos.

Partindo dos mesmos dados para o cabo condutor e $V_b = 38$ m/s, a norma IEC 60826 [19] conduz a uma força a ser aplicada na torre devida ao vento nos cabos igual a 17,2 kN, superior com o valor encontrado de acordo com a NBR 6123 [3] (igual a 14,9kN). Encontram-se, no ANEXO C, um resumo da IEC 60826 [19] sobre força de vento em cabos e os cálculos, partindo dos mesmos dados, para o cabo condutor.

Tabela 18– Comparação dos intervalos de integração

	$\Delta t(s)$ NBR 5422	$\Delta t(s)$ NBR 6123
ISOLADORES	2	3
TORRE	2	5
CABOS CONDUTORES	30	68
CABOS PARARRAIOS	30	66

5. Modelo Completo: torre, cadeia de isoladores e cabos

As Figuras 22 a 25 ilustram o modelo completo do sistema torre – linhas aéreas, conforme adotado por Rodrigues [12].

Segue a modelagem no programa comercial SAP2000 v.14 [30] do modelo completo.

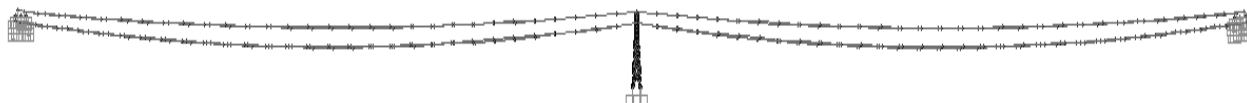


Figura 22 – Descrição vista geral (1 torre representada, 2 vãos adjacentes).

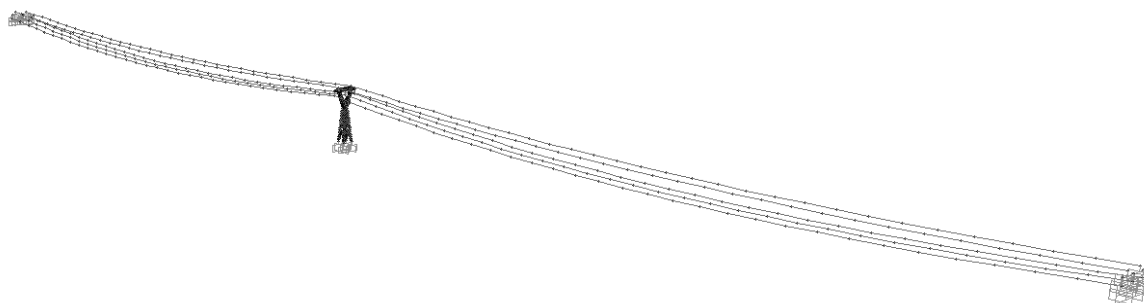


Figura 23 – Vista em perspectiva isométrica do modelo completo (1 torre representada, 2 vãos adjacentes).

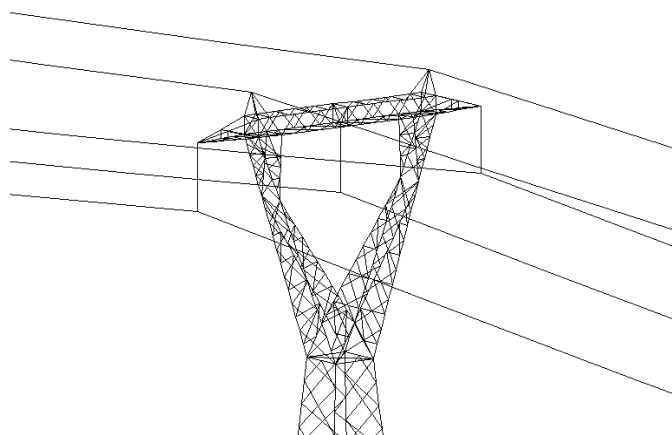


Figura 24 – Detalhe das ligações dos pararraios e cabos condutores à torre (torre em elementos de pórtico espacial).

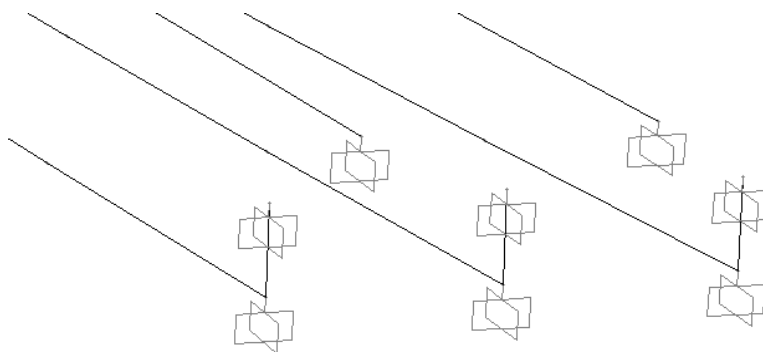


Figura 25 – Detalhe das condições de contorno para cabos.

Os cabos estão engastados nas extremidades, onde estariam conectados a outras estruturas de suporte. Essa condição foi estabelecida para o modelo convergir mais rapidamente.

Os isoladores dos cabos condutores possuem liberação à rotação nas duas extremidades, e são representados por elementos de treliça.

Este modelo foi avaliado para ações de vento segundo a NBR 6123 [3], com $V_0 = 50$ m/s (ver Tabelas 19 a 26).

As forças de vento estáticas em cada cabo condutor (igual a 33,1 N/m) e em cada pararraio (14,7 N/m) foram aplicadas como forças nodais concentradas ao longo dos dois vãos. Esse valores foram obtidos dividindo-se o valor da carga concentrada aplicada na torre devido aos cabos. Para aplicação no modelo completo, aplicamos nodalmente em intervalos iguais de 15 metros, nos cabos.

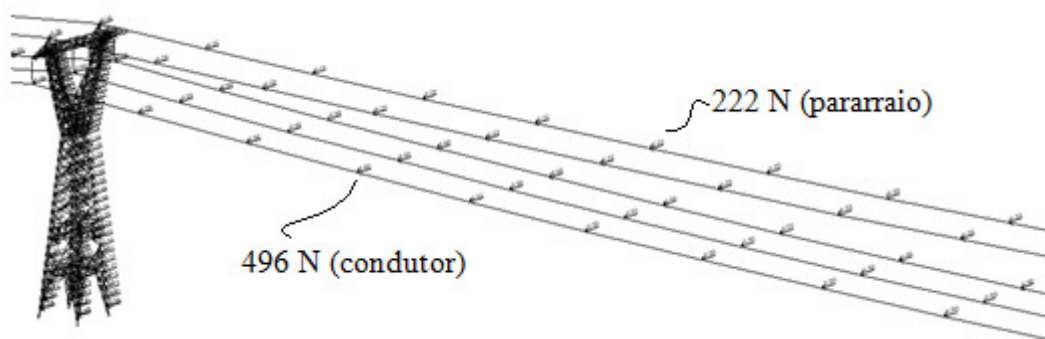


Figura 26- Força nos cabos devido ao vento, aplicadas nodalmente.

6. RESULTADOS DA ANÁLISE

Os resultados da análise são referentes ao caso de carregamento segundo as prescrições da NBR6123 [3] com velocidade básica de vento V_0 igual a 50 m/s, aplicados no modelo simplificado e no modelo completo. Seus esforços foram calculados pelo programa SAP2000 v.14 [30].

A Figura 27 identifica os pontos de verificação dos deslocamentos e a biela de suspensão. O nó A1 apresenta deslocamento de -0,25m no eixo x e -0,14m no eixo z. O nó A2 apresenta deslocamento de -2,4m no eixo x e 0,80m no eixo z. Para ambos os nós, o deslocamento em relação ao eixo y é nulo.

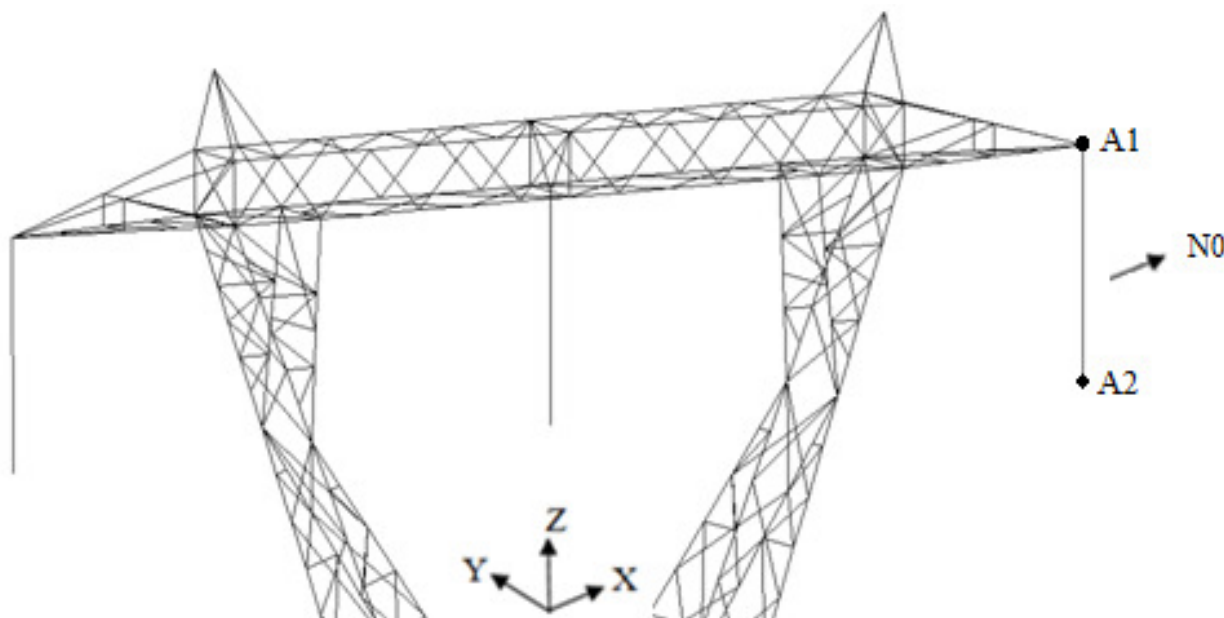


Figura 27 – Ponto de verificação do deslocamento.

A Figura 28 mostra a deformada da estrutura em escala 1:1 no modelo completo. Observa-se, na Figura 28b, a elevação do ponto de ancoragem dos cabos na biela de isoladores.

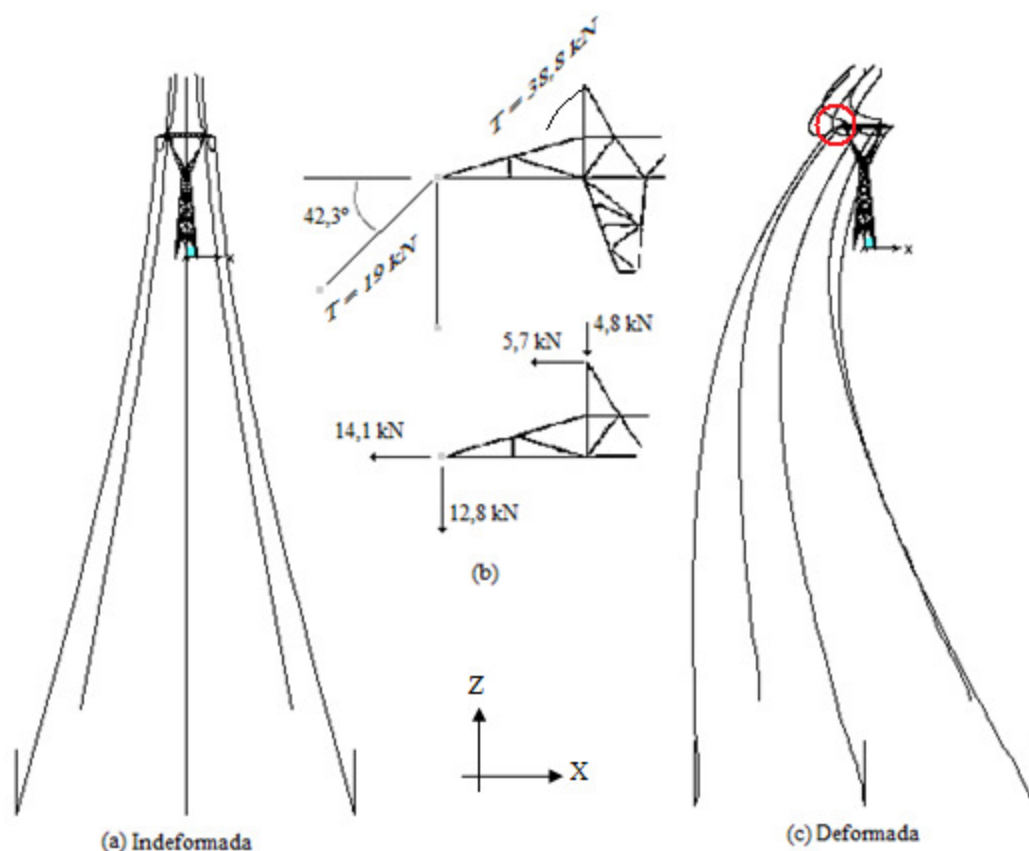


Figura 28 – Deformação dos cabos do modelo para ação de vento mais carga permanente.

Com os deslocamentos dos nós A1 e A2 do modelo completo, obtém-se o esforço na biela igual a 19,4 kN. As componentes horizontal e vertical da tração na biela resultaram em forças iguais a 14,1 kN e 12,8 kN, respectivamente. Comparando a componente horizontal com a força aplicada no modelo simplificado devido ao vento (igual a 14,9 kN – ver Tabela 17), verifica-se que são muito próximas. Já em relação à componente vertical, a força aplicada na ponta da viga de suspensão no modelo completo (igual a 12,8 kN) é bem maior do que a força no modelo simplificado (igual a 5,8 kN), a qual refere-se apenas ao peso dos cabos condutores.

Realizando o mesmo procedimento para os cabos pararraios, utilizando o deslocamento do cabo e analisando a força axial de tração que atua no mesmo (38,8 kN), obtém-se forças horizontal e vertical no plano vertical XZ iguais a 5,7 kN e 4,8 kN, respectivamente. Comparando a componente horizontal com a força aplicada no modelo simplificado devido ao vento (igual a 6,6 kN – ver Tabela 17), verifica-se que são próximas. Já em relação à componente vertical, a força

aplicada no apoio do pararraio no modelo completo (igual a 4,8 kN) é bem maior do que a força no modelo simplificado (igual a 1,7 kN), a qual refere-se apenas ao peso dos cabos pararraios.

Nota-se, então, que a torre no modelo completo estará sujeita a uma força de compressão originada da excursão lateral dos cabos, a qual não é considerada no modelo simplificado.

Nas tabelas 19 e 20 são apresentados os deslocamentos transversal e vertical, em milímetros, do ponto A1. Temos que o modelo completo apresentou uma redução de 3,4% em relação ao modelo simplificado, considerando o deslocamento transversal. Enquanto que houve um aumento de 9,6% do deslocamento vertical do modelo completo em relação ao modelo simplificado. Isso se deve a menor componente horizontal e o maior componente vertical devido aos cabos, atuando na torre.

Tabela 19 – Deslocamento transversal ponto A1, NBR 6123 – $V_0 = 50$ m/s.

Deslocamento Transversal (mm) - Ponto A1		
Modelo	Carga Permanente (CP)	CP + Vento
Simplificado (Análise linear)	-0,30	-264,66
Completo (Análise não linear)	-0,30	-255,74

Tabela 20– Deslocamento vertical ponto A1, NBR 6123 – $V_0 = 50$ m/s.

Deslocamento Vertical (mm) - Ponto A1		
Modelo	Carga Permanente (CP)	CP + Vento
Simplificado (Análise linear)	-5,07	-128,69
Completo (Análise não linear)	-1,57	-142,34

No vão central, os cabos condutores apresentaram deslocamento transversal de -11,24m e vertical de 3,13m.

As Tabelas 21 a 26 apresentam os resultados comparativos entre os dois modelos em termos de esforços axiais em algumas barras da torre, conforme notação mostrada na Figura 29. Para as barras N2, N3, N5 e N6 não há diferença significativa de resultados. Já para as barras N1 e N4, os esforços devidos às ações de carga permanente mais vento apresentam diferenças. Nota-se que a barra N1 tem maior compressão no modelo completo e a barra N4 menor tração, justamente devido ao efeito da excursão dos cabos comentados anteriormente. A diferença em termos de compressão foi de 6%, valor não desprezível na verificação de segurança.

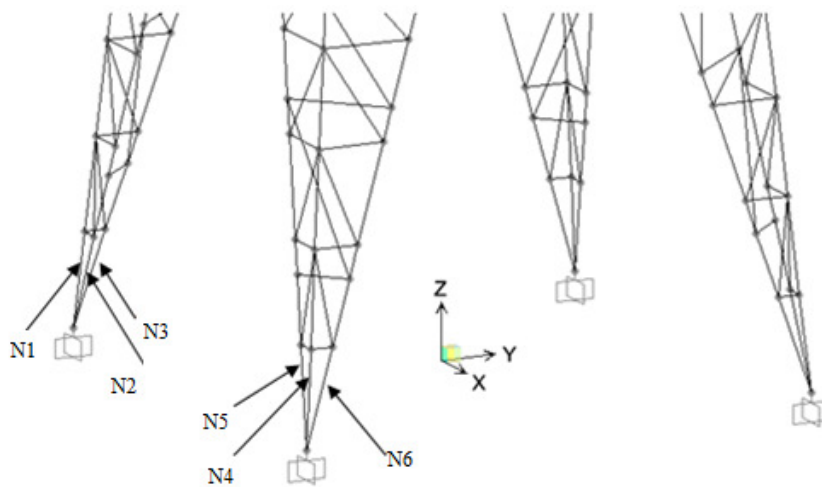


Figura 29 – Identificação dos elementos na base da torre.

Tabela 21– Força axial elemento N1, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N1		
Modelo	Carga Permanente (CP)	CP + Vento
Simplificado (Análise linear)	-8,95	-153,78
Completo (Análise não linear)	-8,93	-162,93

Tabela 22– Força axial elemento N2, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N2		
Modelo	Carga Permanente (CP)	CP + Vento
Simplificado (Análise linear)	-3,39	-52,98
Completo (Análise não linear)	-3,37	-52,99

Tabela 23– Força axial elemento N3, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N3		
Modelo	Carga Permanente (CP)	CP + Vento
Simplificado (Análise linear)	-3,61	-62,72
Completo (Análise não linear)	-3,60	-62,84

Tabela 24 – Força axial elemento N4, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N4		
Modelo	Carga Permanente (CP)	CP + Vento
Simplificado (Análise linear)	-8,95	135,96
Completo (Análise não linear)	-8,93	121,19

Tabela 25– Força axial elemento N5, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N5		
Modelo	Carga Permanente (CP)	CP + Vento
Simplificado (Análise linear)	-3,39	46,25
Completo (Análise não linear)	-3,37	42,63

Tabela 26 – Força axial elemento N6, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N6		
Modelo	Carga Permanente (CP)	CP + Vento
Simplificado (Análise linear)	-3,61	55,55
Completo (Análise não linear)	-3,60	51,28

7. VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL

Segundo Pfeil & Pfeil [14], praticamente não há intervenção da flambagem por torção nas estruturas metálicas usuais, sendo a flambagem por flexo-torção freqüentemente determinante nas estruturas metálicas leves, feitas com chapas finas dobradas.

Neste trabalho, verificaremos os montantes da torre LTEE em relação à suas resistências à tração, compressão e flexão, segundo a NBR 8800 [4].

Quanto à força axial de compressão, no dimensionamento dessas barras, deve ser atendida a condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (7-1)$$

onde:

$N_{c,Sd}$ = força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ = força axial de compressão resistente de cálculo.

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, de uma barra, associada aos estados últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada pela equação (7-2), de acordo com a NBR 8800 [4].

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (7-2)$$

onde:

χ = fator de redução associado à resistência à compressão;

Q = fator de redução total associado à flambagem local, tomado igual a 1,0 para os perfis cantoneira analisados;

A_g = área bruta da seção da barra;

f_y = resistência ao escoamento do aço;

γ_{a1} = coeficiente de ponderação das resistências, igual a 1,1.

Essa mesma norma fornece equações para a determinação do fator de resistência à compressão, χ , que é função do índice de esbeltez reduzido λ_0 .

- Para $\lambda_0 \leq 1,5$:

$$\chi = 0,658 \lambda_0^2 \quad (7-3)$$

- Para $\lambda_0 > 1,5$:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (7-4)$$

sendo o índice de esbeltez λ_0 calculado pela equação (7-5).

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (7-5)$$

onde a força axial de flambagem elástica N_e (kN) das barras de perfil cantoneira dos montantes é calculada como sendo o menor valor entre P_z e P_0 [18], dados pelas equações (7-6) e (7-8).

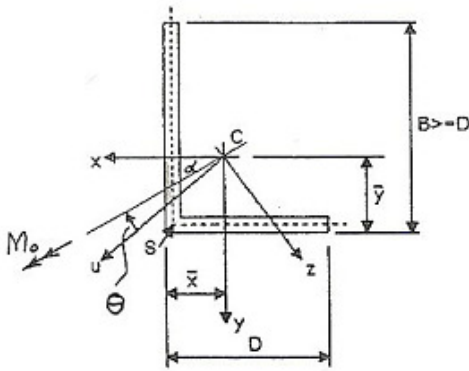


Figura 30 – Eixos da seção transversal de cantoneira simples [17].

$$P_0 = \frac{(P_t + P_u) \pm \left[(P_t + P_u)^2 - 4 P_u P_t \left(1 - \frac{u_0^2}{r_0^2} \right) \right]^{0,5}}{2 \left(1 - \frac{u_0^2}{r_0^2} \right)} \quad (7-6)$$

$$P_u = \frac{\pi^2 EI_u}{L^2} \quad (7-7)$$

$$P_z = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \quad (7-8)$$

$$P_t = \frac{GJ}{r_0^2} \quad (7-9)$$

onde:

P_u = força para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia u da seção transversal;

P_z = força para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia z da seção transversal;

P_t = força para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal t;

P_0 = força para flambagem por flexo-torção;

E = módulo de elasticidade longitudinal do aço;

G = módulo de elasticidade transversal do aço;

u_0 e r_0 são propriedades geométricas da seção;

L = comprimento da cantoneira.

Para elementos de diagonal, seguimos as prescrições do anexo E, item 1.4.3, da NBR 8800 [4], devido à excentricidade da ligação (ligação por uma aba da cantoneira).

Quanto à força axial de tração, no dimensionamento dessas barras, deve ser atendida a condição:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (7-10)$$

onde,

$N_{t,Sd}$ = força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$ = força axial de tração resistente de cálculo.

Para resistência à força axial de tração, $N_{t,Rd}$, verificamos a ruptura da seção bruta, escoamento da seção líquida e ruptura por cisalhamento de bloco, segundo prescrições da NBR 8800 [4].

Adotamos para os elementos de montante três parafusos com diâmetro $\frac{3}{4}$ " galvanizados, por aba. Para os elementos da diagonal adotamos dois parafusos com diâmetro $\frac{3}{4}$ " galvanizados, em cada aba. Os espaçamentos adotados podem ser vistos na Figura 31.

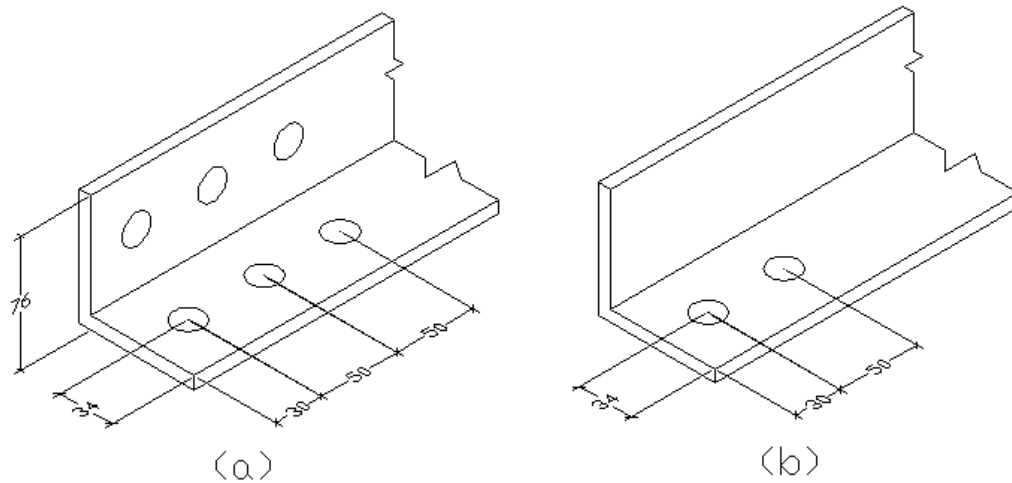


Figura 31 – Exemplo de ligação para perfil cantoneira L 3" x 5/16" para montante (a) e diagonal (b), respectivamente. Dimensões em milímetros.

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, é o menor dos valores obtidos, sendo:

- Para escoamento da seção bruta, NBR 8800 [4]:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (7-11)$$

- Para ruptura da seção líquida, NBR 8800 [4]:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (7-12)$$

onde:

A_g = área bruta da seção transversal da barra;

A_e = área líquida efetiva da seção transversal da barra;

f_u = resistência à ruptura do aço;

γ_{az} = coeficiente de ponderação das resistências, igual a 1,35.

- Cisalhamento de bloco, Pfeil e Pfeil [14]:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{az}} (0,60 f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{az}} (0,60 f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \quad (7-13)$$

onde:

A_{nv} = área líquida cisalhada;

A_{gv} = área bruta cisalhada;

A_{nt} = área líquida tracionada;

$C_{ts} = 1,0$, para tensão de tração uniforme.

Segundo a NBR 8800 [4], no dimensionamento das barras submetidas a momento fletor devem ser atendidas as seguintes condições:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (7-14)$$

onde:

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo;

M_{Rd} = momento fletor resistente de cálculo;

O momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} , foi calculado segundo a AISC [5] pois a NBR 8800 [4] não possui um cálculo específico de resistência ao momento fletor para cantoneiras de abas iguais. Foram utilizadas as prescrições e equações do capítulo F10. *Single Angles* (Cantoneira Simples), as quais não serão apresentadas no presente trabalho. Inicialmente determina-se o

ângulo teta entre o vetor momento solicitante resultante e o eixo de maior inércia da cantoneira. Os momentos fletores resistentes associados aos estados limites de plastificação total e de flambagem lateral são calculados para flexão em torno da direção do momento resultante.

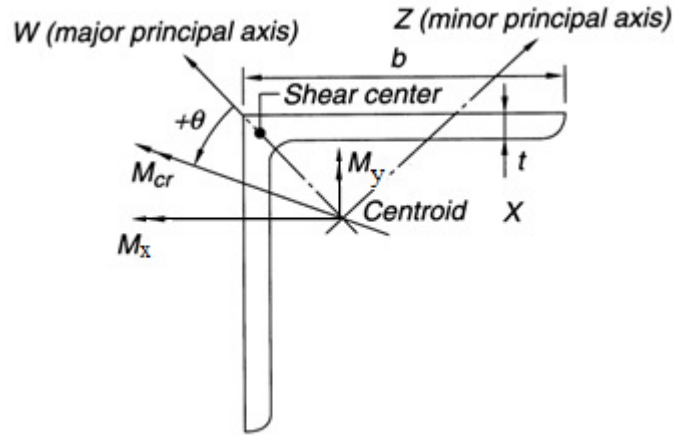


Figura 32 – Momento resistente segundo direção do momento resultante, alterado [5].

Com todos os valores calculados, verificamos as cantoneiras sujeitas aos efeitos combinados de força axial e momentos fletores, segundo o item 5.5.1.2, na NBR 8800 [4].

Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (7-15)$$

Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{2 \cdot N_{Rd}} + \left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (7-16)$$

onde,

N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo de tração ($N_{t,Rd}$) ou compressão ($N_{c,Rd}$), a que for aplicável;

N_{Rd} é a força resistente de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável;

M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo da seção transversal, segundo a direção do vetor resultante dos momentos fletores solicitantes;

M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo da seção transversal, segundo a direção do momento fletor solicitante de cálculo.

Desse modo, são apresentados nas Tabelas 27 a 29 os resultados da verificação estrutural para três modelos.

Tabela 27– Verificação estrutural à flexo-tração e flexo-compressão, modelo simplificado NBR

$$5422 - V_0 = 28 \text{ m/s.}$$

Perfil	N_{sd} (kN)	$M_{Sd,O}$ (kN)	$N_{t,Rd}$ (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)	$M_{Rd,O}$ (kNm)	Item 5.5.1.2 NBR 8800 $\leq 1,0$
N1	-110,48	0,81	233,89	143,04	2,75	1,04
N2	-39,57	0,31	108,88	69,30	2,75	0,67
N3	-44,97	0,26	108,88	69,30	1,28	0,83
N4	84,15	0,48	233,89	143,04	1,28	0,70
N5	29,60	0,22	108,88	69,30	5,62	0,31
N6	34,34	0,17	108,88	69,30	2,69	0,37

Tabela 28– Verificação estrutural à flexo-tração e flexo-compressão, modelo simplificado NBR

$$6123 - V_0 = 50 \text{ m/s.}$$

Perfil	N_{sd} (kN)	$M_{Sd,O}$ (kN)	$N_{t,Rd}$ (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)	$M_{Rd,O}$ (kNm)	Item 5.5.1.2 NBR 8800 $\leq 1,0$
N1	-229,62	2,82	233,89	143,04	2,70	2,53
N2	-73,27	1,04	108,88	69,30	1,71	1,59
N3	-87,35	0,83	108,88	69,30	1,28	1,84
N4	169,26	2,47	233,89	143,04	2,84	1,50
N5	59,83	0,91	108,88	69,30	2,84	0,83
N6	72,09	0,73	108,88	69,30	1,33	1,15

Tabela 29– Verificação estrutural à flexo-tração e flexo-compressão, modelo completo NBR

$$6123 - V_0 = 50 \text{ m/s}$$

Perfil	N_{sd} (kN)	$M_{Sd,\theta}$ (kN)	$N_{t,Rd}$ (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)	$M_{Rd,\theta}$ (kNm)	Item 5.5.1.2 NBR 8800 $\leq 1,0$
N1	-215,28	3,14	233,89	143,04	2,67	2,55
N2	-74,18	1,14	108,88	69,30	1,44	1,77
N3	-87,81	0,94	108,88	69,30	1,59	1,79
N4	190,35	2,14	233,89	143,04	2,67	1,53
N5	64,75	0,79	108,88	69,30	2,67	0,86
N6	77,78	0,63	108,88	69,30	1,47	1,10

Podemos observar que, para o modelo simplificado da NBR 5422 [1], com velocidade básica de vento V_b igual a 28 m/s, a estrutura passa na verificação estrutural quanto à flexo-compressão.

Nos modelos simplificado e completo, utilizando a NBR 6123 [3] com $V_0 = 50$ m/s, a estrutura não passa na verificação estrutural na compressão, flexo-compressão e flexo-tração em todos os perfis, exceto o perfil N5.

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1. Conclusões

Para o estudo proposto no presente trabalho, verificamos, a partir da comparação entre a metodologia de cálculo das NBR 5422 [1] e NBR 6123 [3] uma grande diferença de forças, sendo as da NBR 6123 muito superiores às da NBR 5422, considerando a mesma região de análise.

Essas diferenças são devidas a diversos motivos, dos quais podemos destacar: diferentes intervalos de integração para os componentes da torre LTEE, diferentes intervalos de tempo para definir a velocidade básica de vento e consideração do fator de efetividade. Mesmo fazendo a compatibilização da velocidade básica em termos do intervalo de tempo, foram obtidos valores distintos para o mesmo local.

Adotando velocidades de projeto compatíveis, a NBR 6123 continuou a apresentar valores de carregamento superiores aos da NBR 5422 para os cabos, na ordem de 16% maiores, enquanto que para o suporte, os carregamentos foram semelhantes.

No modelo completo foi realizado uma análise não linear geométrica, para simular de maneira adequada o comportamento estrutural da torre devido aos cabos presentes nos vãos das linhas aéreas de transmissão.

Comparando os resultados obtidos em termos de esforços em elementos da torre através dos modelos completo e simplificado, observam-se resultados semelhantes para a atuação das cargas permanentes e de combinação das cargas permanentes e vento, conforme procedimento da NBR 6123. Entretanto, devido à consideração no modelo completo da excursão lateral dos cabos, a torre apresenta resultante de compressão 6% maior do que o valor obtido no modelo simplificado, valor esse que não pode ser desconsiderado em uma verificação de compressão.

Ao se verificar os perfis cantoneira que compõem a estrutura da torre tipo Delta, verificou-se que os montantes da torre atendem os critérios de segurança para a ação das cargas segundo a NBR 5422, e para as ações dadas pela NBR 6123 a estrutura não apresenta segurança ao colapso.

Das análises efetuadas, comprova-se a necessidade de revisão das normas NBR 5422 e NBR 6123, de modo que apresentem prescrições compatíveis.

8.2. Sugestões para trabalhos futuros

Os seguintes temas são sugestões para prosseguimento em trabalhos futuros:

- a) Inclusão do efeito variação de temperatura nos cabos;
- b) Análise dinâmica das forças de vento;
- c) Análise da influência solo-estrutura (inclusão de bases elásticas nas fundações);
- d) Estudar o comportamento da estrutura considerando a ruptura dos cabos;
- e) Incluir a excentricidade das ligações das barras das torres;
- f) Incluir as imperfeições geométricas de montagem da estrutura treliçada das torres.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **ABNT, NBR 5422** – Projeto de linhas de transmissão de energia elétrica – procedimento, 1985.
2. **ABNT, NBR 5422** – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica – procedimento, Documento de Revisão – Capítulo 7 “Ação do Vento”, Rio de Janeiro, s/data
3. **ABNT, NBR 6123** – Forças devidas ao vento em edificações – procedimento, 1988.
4. **ABNT, NBR 8800** – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, 2008.
5. **AISC, American Institute os Steel Construction, Inc.**, Capítulo F.10 Single Angles, pág. 57-59; 279-283, 2005.
6. **AutoCAD**, Autodesk, 2008.
7. **Acidente na LT 138kV C.S. PCH Paraíso / Chapadão do Sul: Evidência de Atuação de Vento de Alta Intensidade**, Soares, F.G., da Silva, P.R.R.L., Mello, R.C., Ferreira, S.J., Marcílio, L.E., Em: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, 2007.
8. **Aerodinâmica das Construções**, Blessmann, Joaquim, 2ª Edição, Sagra, 1990.
9. **Análise de Confiabilidade Estrutural de Torres de Transmissão de Energia Elétrica quando Sujeitas a Ventos Fortes via Método Analítico FORM**, Hatashita, L.S., Justino, M.R., Abdalla, J.E., Em: Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, XIII ERIAC, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.
10. **Análise de Confiabilidade de Torres de Transmissão de Energia Elétrica quando Sujeitas a Ventos Fortes via Método Analítico FORM**, Hatashita, L.S., Tese de Mestrado, Engenharia Mecânica, PUC Paraná, 2007.

11. **Banco de Informações de Geração ANEEL**, Referência: www.aneel.gov.br, 24 de fevereiro de 2010. Pesquisado: 29/12/2011, 12:46 PM.
12. **Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento**, Rodrigues, R.S., Tese de Mestrado, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1999.
13. **Ensaio em Protótipos de Torres de Transmissão Avaliação de Resultados e Falhas**, Ferreira da Silva, J.B.G., Cadete, M.A.M, 4º ERLAC – Puerto Iguazu, 1991 – CIGRÉ.
14. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático**, Pfeil, W., Pfeil, M. – 8.ed – Rio de Janeiro: LTC, 2009.
15. **Evaluation of the Probability Distribution of the Strength of Transmission Line Steel Towers based on Tower Test Results**, Riera, J.D., de Menezes, R.C.R., da Silva, V.R., Ferreira da Silva, J.B.G.
16. **Fundações de Torres de Linhas de Transmissão e de Telecomunicação**, Chaves, R.A., Tese de Mestrado, Engenharia Civil, UFMG, 2004.
17. **Matriz Energética Brasileira: uma prospectiva**, Tolmasquim, M.T., Guerreiro, A., Gorini, R., CEBRAP no.79 São Paulo, Nov. 2007.
18. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**, 5th ed., Edited by Theodore V. Galambos, John Wiley & Sons, Inc., Chapter Eleven – Stability of Angle Members.
19. **IEC 60826** – Design criteria of overhead transmission lines – Third edition, 2003.
20. **Incertezas de Modelo na Análise de Torres Metálicas Treliçadas de Linhas de Transmissão**, Kaminski Junior, J., Tese de Doutorado, Engenharia Civil, UFRGS, 2007.
21. **Mathcad v.14**, PTC, 2007.
22. **Mecânica do Colapso Aeroelástico de Torres TEE**, Rodrigues, R.S., Tese de Doutorado, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2004.

23. **Metodologia para Análise Estática do Efeito do Vento em Linhas de Transmissão**, Carvalho, H., Tese de Mestrado, Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da UFMG, 2010.
24. **Microsoft Office Excel**, Microsoft, 2007.
25. **A risk model for design of transmission line system against thunderstorm downburst winds**, Holmes, J.D., Moriarty, W.W. e Oliver, S.E., Engineering Structures, 2000.
26. **O Vento na Engenharia Estrutural**, Blessmann, Joaquim, Ed. Universidade/UFRGS, 1995.
27. **On the Variability of Mechanical Properties of Materials for Transmission Line Steel Towers**, de Menezes, R.C.R., Ferreira da Silva, J.B.G., ÉLECTRA Nº189, Abril 2000.
28. **Referência**, site: http://www.alibaba.com/product-gs/296349505/Overhead_Transmission_Tower.html, Pesquisa: 19/01/2012, 15:55 PM.
29. **Relatórios Técnicos Contrólato nº 8,10 e 14**, Battista, R.C., 2010 e 2011.
30. **SAP 2000 v.14**, CSI, 2011.
31. **Uso Conjugado dos Softwares Pls-cadd e Tower em Projetos de Linhas de Transmissão – Experiência e Metodologia da COPEL a Avaliação Estrutural de Torres**, Hatashita, L.S., Hoffmann, J.N., Pedroso, C.D.V., Em: Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, XIII ERIAC, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.
32. **Ventos derrubam duas linhas de transmissão**, Jornal O Globo, pág. 31, 1ª Edição, Primeiro Caderno, 16/06/2005.
33. **Ventos fortes derrubam sete torres de transmissão da Copel em Cascavel**, Divulgação/Copel, Paraná Online 19/08/2011, Pesquisa em 21/12/2011, 13:32 PM

ANEXO A – Determinação do tempo de integração para cabos condutores e pararraios, para cálculo do fator S_2 .

Desenvolvimento dos cálculos no programa Mathcad v.14.

Cálculo da velocidade de vento médio para determinação da força equivalente estático uniformemente distribuída (NBR 6123)

Seguindo prescrições Anexo A, NBR 6123, para linha condutora: $h := 22.9$ $V_k := 1.1 \cdot 50 \frac{m}{s}$

Intervalo de tempo para $L=450m$

$$L := 450m \quad t(i) := \frac{7.5 \cdot L}{V_i}$$

$$\text{para: } t_0 := 120s \quad V_1 := 0.77 \cdot V_k \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0.135} = 47.362 \frac{m}{s}$$

$$t_1 := \frac{7.5 \cdot L}{V_1} = 71.259 s$$

$$V_2 := 0.811 \cdot V_k \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0.127} = 49.554 \frac{m}{s}$$

$$t_2 := \frac{7.5 \cdot L}{V_2} = 68.107 s$$

$$V_3 := 0.813 \cdot V_k \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0.126} = 49.636 \frac{m}{s}$$

$$t_3 := \frac{7.5 \cdot L}{V_3} = 67.996 s$$

$$V_4 := 0.813 \cdot V_k \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0.126} = 49.636 \frac{m}{s}$$

$$t_4 := \frac{7.5 \cdot L}{V_4} = 67.996 s$$

$$V := V_4 = 49.6 \frac{m}{s} \quad t := t_4 = 68.0 s$$

Seguindo prescrições Anexo A, NBR 6123, para linha para-raio: $\underline{h} := 28$ $\underline{V_k} := 1.1 \cdot 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Intervalo de tempo para $L=450\text{m}$

$$\underline{L} := 450\text{m} \quad \underline{t(i)} := \frac{7.5 \cdot L}{V_i}$$

$$\text{para: } \underline{t_0} := 120\text{s} \quad \underline{V_1} := 0.77 \cdot V_k \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0.135} = 48.665 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\underline{t_1} := \frac{7.5 \cdot L}{V_1} = 69.351 \text{ s}$$

$$\underline{V_2} := 0.812 \cdot V_k \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0.127} = 50.899 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\underline{t_2} := \frac{7.5 \cdot L}{V_2} = 66.308 \text{ s}$$

$$\underline{V_3} := 0.809 \cdot V_k \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0.126} = 50.659 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\underline{t_3} := \frac{7.5 \cdot L}{V_3} = 66.622 \text{ s}$$

$$\underline{V_4} := 0.815 \cdot V_k \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0.126} = 51.034 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\underline{t_4} := \frac{7.5 \cdot L}{V_4} = 66.132 \text{ s}$$

$$\underline{V} := V_4 = 51.0 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \underline{t} := t_4 = 66.1 \text{ s}$$

ANEXO B - Correção da Velocidade Básica de Vento para tempo de integração de 10 minutos.

Será utilizada a equação (2-9).

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (2-9)$$

Utilizaremos $S_1 = 1,0$, $S_3 = 1,1$ e $V_0 = 50$ m/s.

Os parâmetros b , p e F_r são retirados da Tabela 21 da NBR 6123. Os valores para 10 minutos de integração são:

$$b = 1,00$$

$$p = 0,15$$

$$F_r = 0,69$$

$$z = 10\text{m}$$

Utilizando a equação (2-9), e substituindo os valores na mesma, ficaremos com uma velocidade corrigida para 10 metros acima do solo de:

$$V_p(10 \text{ min.}) = 0,69V_0 \text{ (m/s)}$$

$$V_p = 34,5 \text{ m/s, para } V_0 = 50 \text{ m/s}$$

Considerando $S_3 = 1,1$.

$$V_p = 34,5 * 1,1 \text{ (m/s)- para } V_0 = 50 \text{ m/s}$$

$$V_{p,adotado} = 38 \text{ m/s}$$

Fazendo a conta contrária para calcular $V_b = 28$ m/s, com tempo de integração de 10 minutos para 3 segundos, teremos:

$$V_0 = 28/0,69 = 40,6 \text{ m/s}$$

ANEXO C – Resumo da IEC 60826 sobre força de vento em cabos e os cálculos partindo dos mesmos dados para o cabo condutor.

Para os propósitos desta norma, o nível de confiabilidade de referência é definido como a confiabilidade de uma linha projetada para um período de retorno de 50 anos para eventos climáticos com 10% de limite de exclusão de força. O nível de confiabilidade de referência é geralmente considerado como fornecendo um nível aceitável de confiabilidade em respeito à continuidade do serviço e segurança.

A força de vento a , em N/m², em cabos é dado pela equação (C-1):

$$A_c = q_0 C_{xc} G_c G_L d \sin^2 \Omega \quad (C-1)$$

Sendo q_0 a pressão dinâmica de referência de vento, em N/m², dado em termos da velocidade de vento de referência V_R modificada pela fator de rugosidade K_R , correspondente com a categoria do terreno onde se localiza o cabo.

$$q_0 = \frac{1}{2} \tau \mu (K_R V_{RB})^2 \quad (C-2)$$

Onde,

μ é a massa de ar por volume igual a 1,225 kg/m³ a temperatura de 15°C e uma pressão atmosférica de 101,3 kPa ao nível do mar;

τ é o fator de correção da densidade do ar para variação de temperatura e altura, vide Tabela C.2;

C_{xc} é o coeficiente de arrasto de cabos condutores, tomado igual a 1,0 geralmente;

G_c é o fator de vento combinado dado na Figura C.1, que depende da altura z e da categoria do terreno;

G_L é o fator de vão dado na Figura C.2;

d é o diâmetro do condutor;

L é o vão de vento do suporte, tomado como a metade da soma entre vãos adjacentes;

Ω é o ângulo de incidência entre vento e condutor, vide Figura C.3;

K_R é o coeficiente de rugosidade do terreno, vide Tabela C.1;

V_{RB} é a velocidade básica de vento, medida a 10 metros acima do solo, sendo a média de um período de 10 minutos.

A altura a ser considerada para os condutores é o centro de gravidade do condutor suspenso, teoricamente localizado no terço inferior da flecha.

Campo de Aplicação:

- Comprimento de vão entre 200m e 800m;
- Suportes com altura até 60m;
- Altitude das áreas atravessadas não superior a 1300m;
- Terrenos sem características de topografia local cujo tamanho e forma afetam significativamente o perfil de vento na região considerada.

De acordo com a rugosidade do terreno, temos a seguinte classificação para K_R .

Tabela C.1 – Coeficientes de Rugosidade do Terreno, IEC 60826 [19]

Terrain category	Roughness characteristics	K_R
A	Large stretch of water upwind, flat coastal areas	1,08
B	Open country with very few obstacles, for example airports or cultivated fields with few trees or buildings	1,00
C	Terrain with numerous small obstacles of low height (hedges, trees and buildings)	0,85
D	Suburban areas or terrain with many tall trees	0,67

Que é idêntica a classificação utilizada pela NBR 5422 [1].

Tabela C.2 – Fator de correção τ da pressão dinâmica de referência de vento devido à altitude e temperatura, IEC 60826 [19].

Temperature °C	Altitude m			
	0	1 000	2 000	3 000
30	0,95	0,84	0,75	0,66
15	1,00	0,89	0,79	0,69
0	1,04	0,94	0,83	0,73
-15	1,12	0,99	0,88	0,77
-30	1,19	1,05	0,93	0,82

NOTE The reference value corresponds to 0 m altitude and a temperature of 15 °C.

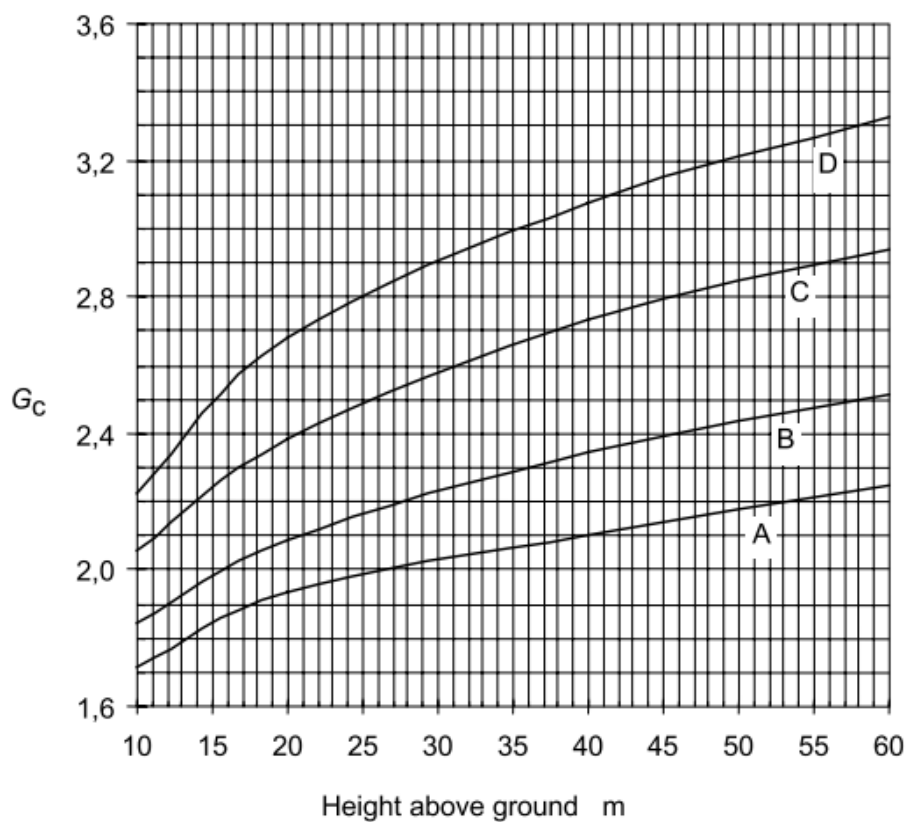


Figura C.1 – Fator combinado de vento G_c para condutores para vários tipos categoria de terreno e altura acima do solo, IEC 60826 [19].

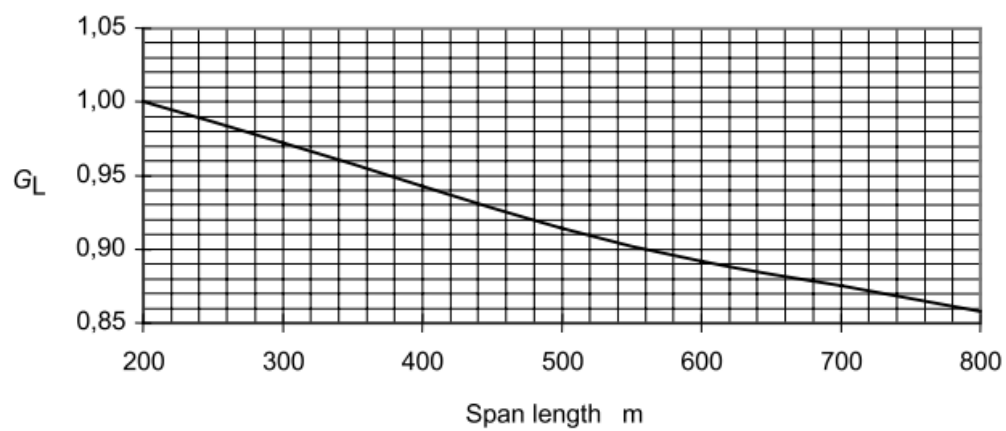


Figura C.2 – Fator de vão G_L , IEC 60826 [19].

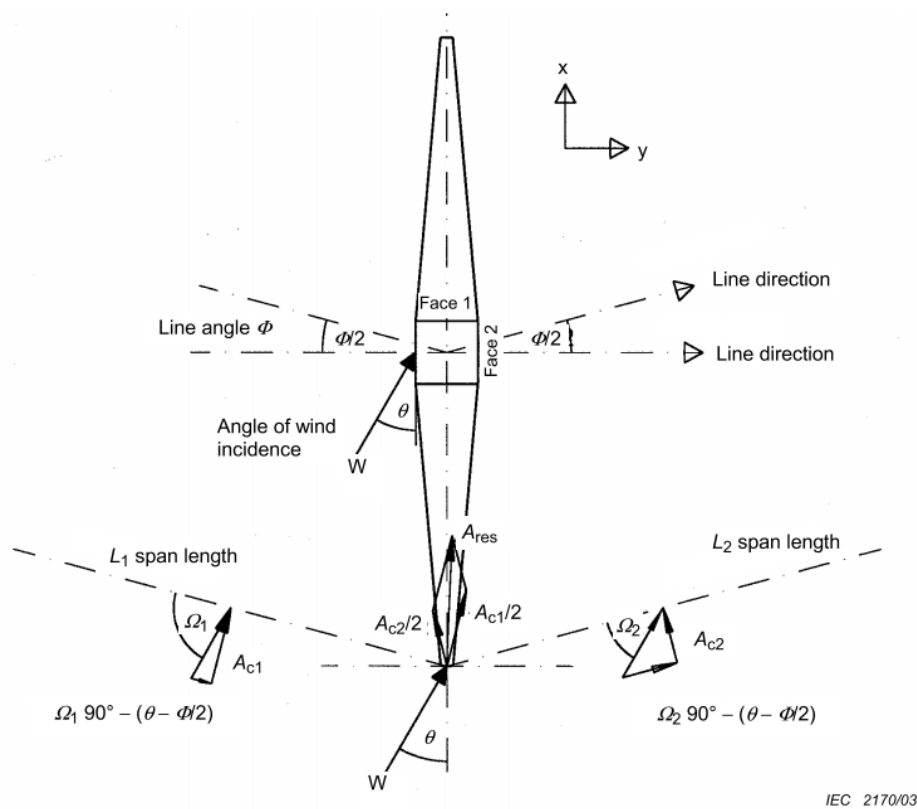


Figura C.3 – Definição do ângulo de incidência do vento, IEC 60826 [19].

Aplicação da IEC 60826, partindo dos mesmo dados do cabo condutor

- Terreno Categoria B;
- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$;
- $\tau = 1,0$;
- $K_R = 1,0$;
- $C_{xc} = 1,0$;
- $G_L = 0,93$;
- $G_c = 2,12$;
- $L = 450\text{m}$;
- $d = 0,0219\text{m}$;

Para $V_{RB} = 28 \text{ m/s}$ – $A_c = 9,33 \text{ kN}$.

Para $V_{RB} = 38 \text{ m/s}$ – $A_c = 17,2 \text{ kN}$.

ANEXO D – Propriedades para Dimensionamento das Cantoneiras de abas iguais

Fonte: http://www.blucher.com.br/materiaisdeapoio/03691_anexos.pdf

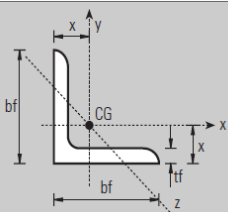


Tabela E.1 — Cantoneiras de abas iguais
Propriedades para dimensionamento

b_f		F	A	t_f		$I_x = I_y$	$W_x = W_y$	$r_x = r_y$	$r_{x,min}$	x
pol	cm	kg/m	cm ²	pol	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm
1/2"	1,270	0,25	0,70	1/8"	0,317	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
5/8"	1,588	0,71	0,90	1/8"	0,317	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
3/4"	1,905	0,87	1,11	1/8"	0,317	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
7/8"	2,220	1,04	1,32	1/8"	0,317	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66
1"	2,540	1,49	1,90	3/16"	0,476	0,79	0,54	0,66	0,48	0,74
		1,19	1,48	1/8"	0,317	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76
		1,73	2,19	3/16"	0,476	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
1 1/4"	3,175	2,22	2,84	1/4"	0,635	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86
		1,50	1,93	1/8"	0,317	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89
		2,20	2,77	3/16"	0,476	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
1 1/2"	3,810	2,86	3,62	1/4"	0,635	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02
		1,83	2,32	1/8"	0,317	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07
		2,68	3,42	3/16"	0,476	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12
1 3/4"	4,445	3,48	4,45	1/4"	0,635	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19
		2,14	2,71	1/8"	0,317	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22
		3,15	4,00	3/16"	0,476	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30
		4,12	5,22	1/4"	0,635	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35
2"	5,080	5,04	6,45	5/16"	0,794	11,20	3,77	1,32	0,86	1,41
		2,46	3,10	1/8"	0,317	7,91	2,13	1,60	1,02	1,40
		3,63	4,58	3/16"	0,476	11,70	3,13	1,58	1,02	1,45
		4,74	6,06	1/4"	0,635	14,60	4,10	1,55	0,99	1,50
		5,83	7,42	5/16"	0,794	17,50	4,91	1,53	0,99	1,55
2 1/2"	6,350	6,99	8,76	3/8"	0,952	20,00	5,73	1,50	0,99	1,63
		4,57	5,80	3/16"	0,476	23,00	4,91	1,98	1,24	1,75
		6,10	7,67	1/4"	0,635	29,00	6,40	1,96	1,24	1,83
		7,44	9,48	5/16"	0,794	35,00	7,87	1,93	1,24	1,88
		8,78	11,16	3/8"	0,952	41,00	9,35	1,91	1,22	1,93
3"	7,620	5,52	7,03	3/16"	0,476	40,00	7,21	2,39	1,50	2,08
		7,29	9,29	1/4"	0,635	50,00	9,50	2,36	1,50	2,13
		9,07	11,48	5/16"	0,794	62,00	11,60	2,34	1,50	2,21
		10,71	13,61	3/8"	0,952	75,00	13,60	2,31	1,47	2,26
		12,34	15,67	7/16"	1,111	83,00	15,60	2,31	1,47	2,31
		14,00	17,74	1/2"	1,270	91,00	18,00	2,29	1,47	2,36
4"	10,160	9,81	12,51	1/4"	0,635	125,00	16,40	3,17	2,00	2,77
		12,19	15,48	5/16"	0,794	154,00	21,30	3,15	2,00	2,84
		14,57	18,45	3/8"	0,952	183,00	24,60	3,12	2,00	2,90
		16,80	21,35	7/16"	1,111	208,00	29,50	3,12	1,98	2,95
		19,03	24,19	1/2"	1,270	233,00	32,80	3,10	1,98	3,00
		21,26	26,96	9/16"	1,429	254,00	36,10	3,07	1,98	3,07
		23,35	29,73	5/8"	1,588	279,00	39,40	3,05	1,96	3,12
		25,35	32,50	3/4"	1,905	304,00	42,70	3,03	1,94	3,17
5"	12,700	18,30	23,29	3/8"	0,952	362,00	39,50	3,94	2,51	3,53
		24,10	30,64	1/2"	1,270	470,00	52,50	3,91	2,49	3,63
		29,80	37,8	5/8"	1,588	566,00	64,00	3,86	2,46	3,76
		35,10	44,76	3/4"	1,905	653,00	73,80	3,81	2,46	3,86
		40,00	51,60	7/8"	2,222	731,00	82,60	3,76	2,43	3,96
6"	15,240	22,22	28,12	3/8"	0,952	641,00	57,40	4,78	3,02	4,17
		29,20	37,09	1/2"	1,270	828,00	75,40	4,72	3,00	4,27
		36,00	45,86	5/8"	1,588	1.007,00	93,50	4,67	2,97	4,39
		42,70	54,44	3/4"	1,905	1.173,00	109,90	4,65	2,97	4,52
		49,30	62,76	7/8"	2,222	1.327,00	124,60	4,60	2,97	4,62

ANEXO E – Cálculo para vento estático segundo NBR 5422.

Vento Estático segundo NBR 5422								
Cabos Condutores			Cabos Pararraios			Isoladores		
Vb	38,00	m/s	Vb	38,00	m/s	Vb	38,00	m/s
Kr	1,00	0,00	Kr	1,00	-	Kr	1,00	-
Kd	1,21	0,00	Kd	1,21	-	Kd	1,41	-
H	22,89	m	H	29,42	m	H	29,55	m
n	11,00	-	n	11,00	-	n	12,00	-
Vp	49,58	m/s	Vp	50,72	m/s	Vp	58,64	m/s
t	15,00	°c	t	15,00	°c	t	15,00	°c
ALT	0,00	m	ALT	0,00	m	ALT	0,00	m
r	1,23	kg/m³	r	1,23	kg/m³	r	1,23	kg/m³
q0	1506,01	N/m²	q0	1576,31	N/m²	q0	2107,30	N/m²
	1,51	kN/m²		1,58	kN/m²	0,00	2,11	kN/m²
Cxc	1,00	-	Cxc	1,00	-	Cxc	1,20	-
alfa	0,86	-	alfa	0,86	-	Si	0,07	m
d	0,02	-	d	0,01	m	Ac	184,80	N
Z	450,00	-	Z	450,00	m		0,18	kN
q	90,00	grau	q	90,00	grau			
Ac	12800,96	N	Ap	5,6	kN			
	12,8	kN						

Suporte	faixa 1	faixa 2	faixa 3	faixa 4	faixa 5	faixa 6	faixa 7	
Vb	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	m/s
Kr	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-
Kd	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	-
H	3,41	6,58	10,49	15,42	20,26	25,25	30,22	m
n	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	-
Vp	48,99	51,74	53,79	55,55	56,83	57,88	58,75	m/s
t	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	°c
ALT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	m
r	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	kg/m³
q0	1470,71	1640,68	1773,11	1890,81	1978,79	2052,77	2115,15	N/m²
	1,47	1,64	1,77	1,89	1,98	2,05	2,12	kN/m²
q	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	graus
ST1	1,09	1,86	1,11	1,71	1,59	1,58	1,18	-
ST2	1,01	2,31	3,26	1,68	1,87	1,19	2,92	-
Cxt1	2,35	3,18	3,36	3,34	3,10	3,05	2,62	-
Cxt2	2,40	3,05	3,05	3,34	3,05	2,70	2,84	-
At	3766,04	9705,84	6590,53	10803,53	9753,71	9880,41	6543,90	N
	3,77	9,71	6,59	10,80	9,75	9,88	6,54	kN

ANEXO F –Cálculo para vento estático segundo NBR 6123.

Vento Estático segundo NBR 6123								
Cabos Condutores			Cabos Pararraios			Isoladores		
V0	50,00	m/s	V0	50,00	m/s	V0	50,00	m/s
S1	1,00	-	S1	1,00	-	S1	1,00	-
S2	0,90	-	S2	0,93	-	S2	1,10	-
S3	1,10	-	S3	1,10	-	S3	1,10	-
H	22,90	m	H	28,37	m	H	29,55	m
b	1,00	-	b	1,00	-	b	1,00	-
Fr	0,81	-	Fr	0,82	-	Fr	1,00	-
p	0,13	-	p	0,13	-	p	0,09	-
Vp	49,64	m/s	Vp	51,12	m/s	Vp	60,31	m/s
q0	1510,24	N/m²	q0	1601,79	N/m²	q0	2229,36	N/m²
	1,51	kN/m²	0,00	1,60	kN/m²	0,00	2,23	kN/m²
Ca	1,00	-	Ca	1,00	-	Ca	1,20	-
d	0,0219	m	d	0,0092	m	d	0,0252	m
l	450,00	m	Z	450,00	m	l	2,90	m
q	90,00	grau	q	90,00	graus	Ap	195,51	N
Ac	14883,40	N	Ap	6597,54	N	Ap	0,20	kN
	14,88	kN	Ap	6,60	kN			

Suporte	faixa 1	faixa 2	faixa 3	faixa 4	faixa 5	faixa 6	faixa 7	
V0	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	m/s
S1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-
S2	0,92	0,93	0,98	1,02	1,04	1,06	1,08	-
S3	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	-
H	3,41	6,58	10,49	15,42	20,26	25,25	30,22	m
Vk	50,60	51,15	53,90	56,10	57,20	58,30	59,40	m/s
q	1569,50	1603,81	1780,89	1929,24	2005,64	2083,52	2162,88	N/m²
	1,57	1,60	1,78	1,93	2,01	2,08	2,16	kN/m²
Ca	2,38	3,25	3,50	3,42	3,23	3,21	2,70	-
Ae	1,09	1,86	1,11	1,71	1,59	1,58	1,18	m
F	4070,33	9696,55	6895,30	11287,13	10300,61	10554,50	6895,89	N
F	4,07	9,70	6,90	11,29	10,30	10,55	6,90	kN

ANEXO G – Cálculo de verificação estrutural segundo NBR 8800.

Propriedades:					
E =	200000,00	MPa	Kv =	1,20	
G =	77000,00	MPa	K (coef. flamb.) =		1,00
βa =	0,00	°C-1			
v =	0,30	-			
γa	1,10	-	γa2	1,35	-
ρa =	7850,00	kg/m³	Cts	1,00	tração uniforme

Resistência Compressão																		
E	K	(b/t)lim	Qs	Q	Pu(kN)	Pz(kN)	Pt(kN)	P0(kN)	Pcrit(kN)	λ0	χ	Nc,Rd (kN)	KxIx	Pcrit(kN)	λ0	χ	Nc,Rd (kN)	Nc,Rd (kN)
N1	1	225	1	1	721,1	478,8	3042,1	319,8	319,8	1,20	0,55	143	2,2	249,1	1,36	0,46	193,0	143,0
N2	1	225	1	1	272,0	151,0	759,7	192,1	151,0	1,24	0,53	69	2,1	107,9	1,47	0,41	85,7	69,3
N3	1	225	1	1	272,0	151,0	759,7	192,1	151,0	1,24	0,53	69	2,1	107,9	1,47	0,41	85,7	69,3
N4	1	225	1	1	721,1	478,8	3042,1	319,8	319,8	1,20	0,55	143	2,2	249,1	1,36	0,46	193,0	143,0
N5	1	225	1	1	272,0	151,0	759,7	192,1	151,0	1,24	0,53	69	2,1	107,9	1,47	0,41	85,7	69,3
N6	1	225	1	1	272,0	151,0	759,7	192,1	151,0	1,24	0,53	69	2,1	107,9	1,47	0,41	85,7	69,3

Resistência Tração																	
E	Qa	Parafuso *	Diâmetro (pol)	Ag (cm²)	An (cm²)	Lmáx(m)	Ver.	Esc. Seq. Bruta (kN)	Ct	Rup. Seq. Líq. (kN)	Área Trac. (cm²)	Área Cis. Br. (cm²)	Área Cis. Liq (cm²)	a (kN)	b (kN)	Rup. Cis. Bloco	Nt,Rd (kN)
N1	1	ASTM A394 tipo 1	3/4"	11,5	7,9	4,5	OK	260,9	1,0	233,9	5,5	20,6	9,6	332,8	330,4	330,4	233,9
N2	1	ASTM A394 tipo 1	3/4"	5,8	3,7	3,7	OK	131,8	1,0	108,9	2,7	12,4	5,8	183,9	188,3	183,9	108,9
N3	1	ASTM A394 tipo 1	3/4"	5,8	3,7	3,7	OK	131,8	1,0	108,9	2,7	12,4	5,8	183,9	188,3	183,9	108,9
N4	1	ASTM A394 tipo 1	3/4"	11,5	7,9	4,5	OK	260,9	1,0	233,9	5,5	20,6	9,6	332,8	330,4	330,4	233,9
N5	1	ASTM A394 tipo 1	3/4"	5,8	3,7	3,7	OK	131,8	1,0	108,9	2,7	12,4	5,8	183,9	188,3	183,9	108,9
N6	1	ASTM A394 tipo 1	3/4"	5,8	3,7	3,7	OK	131,8	1,0	108,9	2,7	12,4	5,8	183,9	188,3	183,9	108,9

Parafuso *	MPa	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"
	fup na tração	d (cm)	d (cm)	d (cm)	d (cm)	Ag (cm²)	Ag (cm²)	Ag (cm²)	Ag (cm²)
ASTM A394 tipo 0	510,00	1,27	1,59	1,90	2,22	1,26	1,98	2,85	3,88
ASTM A394 tipo 1	825,00	1,27	1,59	1,90	2,22	1,26	1,98	2,85	3,88
ASTM A394 tipo 2	825,00	1,27	1,59	1,90	2,22	1,26	1,98	2,85	3,88
ASTM A394 tipo 3	825,00	1,27	1,59	1,90	2,22	1,26	1,98	2,85	3,88

Valores para modelo completo, $V_0 = 50$ m/s, NBR 6123.

Perfil	Mx	My	M res.	arc tan	Θ	Mcrit	lmax = lu	lx = ly	lxy (cm4)	I Θ	y max	My Θ	My Θ /Mcrit	Mn	Me	Mn
N1	-0,07	-3,14	3,14	88,72	2,38	83,08	38,90	62,40	-23,50	38,92	5,46	1,78	0,02	2,67	32,64	2,67
N2	-0,51	-1,02	1,14	63,43	2,82	11,16	16,06	23,00	-6,94	18,84	4,90	0,96	0,09	1,44	7,79	1,44
N3	0,24	-0,91	0,94	75,23	2,10	34,39	16,06	23,00	-6,94	16,96	4,00	1,06	0,03	1,59	7,79	1,58
N4	-0,07	2,14	2,14	88,13	-0,82	19,56	38,90	62,40	-23,50	38,95	5,48	1,78	0,09	2,67	32,64	2,67
N5	-0,37	0,70	0,79	62,14	-1,27	3,80	16,06	23,00	-6,94	19,09	4,88	0,98	0,26	1,47	7,79	1,47
N6	0,10	0,62	0,63	80,84	-0,16	6,71	16,06	23,00	-6,94	20,82	4,82	1,08	0,16	1,62	7,79	1,60

Perfil	Mrd Θ
N1	2,67
N2	1,44
N3	1,59
N4	2,67
N5	2,67
N6	1,47